Institut National des Sciences Appliquées

Département Génie Civil et Topographie
Spécialité Topographie

Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur

Intégration du logiciel de compensation LTOP aux méthodes de travail de TPLM-3D pour les chantiers spéciaux

Mémoire présenté en **Septembre 2012** par **Matthieu Tracol**

Réalisé au sein de l'entreprise : **SARL TPLM-3D**
1, rue Édouard Prénat
69700 Givors

Directeur de PFE :
M. David Desbuisson
Co-gérant

Correcteurs :
Mme Tania Landes
M. Jean-Claude Fischer

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon maître de stage, David Desbuisson, co-gérant de TPLM-3D, pour m'avoir reçu au sein de son entreprise en tant que stagiaire Ingénieur. Un grand merci pour sa confiance qui m'a permis de mener ce projet à bout, ainsi que pour son encadrement et ses conseils. Ils ont facilité nos échanges et m'ont été précieux tout au long de mon projet de fin d'études.

J'adresse aussi mes remerciements à Stéphane Hopp, co-gérant, et à l'ensemble du personnel de TPLM-3D qui a su m'intégrer rapidement ; à Xavier Gérard, Julien Vessela, et Valentin Michel, pour leur aide, leurs conseils et le partage de leurs diverses expériences en topographie.

Je remercie M. Yves Egels, enseignant-chercheur à l'IGN et l'ENSG, pour avoir mis à ma disposition une licence temporaire pour l'utilisation du logiciel Comp3D dans le cadre de mon projet.

Des remerciements très particuliers au Professeur Paul-Henri Cattin, enseignant-chercheur à Heig-Vd, pour m'avoir permis d'utiliser le logiciel TRINET+ ; pour sa formation dispensée sur le logiciel LTOP, son soutien et ses réponses toujours complètes à mes interrogations.

Merci à Tania Landes et Jean-Claude Fischer, pour leur écoute et l'intérêt qu'ils ont porté à mon projet.

Je n'oublie pas mes vérificateurs, qui ont contribué à l'état orthographique, grammatical et syntaxique de ce mémoire.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à mon chirurgien et mon kinésithérapeute pour la remise en état de mon genou droit, ainsi qu'à mes parents pour leur soutien inconditionnel depuis tant d'années.

Table des matières

Introduction **1**

Partie 1 : Etat de l'Art **3**

1.1 Inventaire des logiciels d'ajustements de mesures topographiques 3

1.1.1 Les logiciels commerciaux 3

1.1.1.1 LTOP (E. Gubler [2003]) 3

1.1.1.2 TRINET+ (S. Guillaume et Al. [2008], P.H. Cattin [2007]) 4

1.1.1.3 Leica GeoMos (Leica@ [2012]) 4

1.1.1.4 Trimble Geomatics Office (Trimble@ [2012]) 5

1.1.1.5 GeoLab (Bitwise Ideas@ [2012]) 5

1.1.1.6 Covadis (Geomedia@ [2012]) 5

1.1.1.7 Azitop (Azimut@ [2004]) 6

1.1.2 Les logiciels issus de la recherche et non commercialisés 6

1.1.2.1 LGC "Logiciel Général de Compensation" (M.Jones [2002], M. Mayoud et Al. [1988]) 6

1.1.2.2 GCP "Global Compensation Program" 7

1.1.2.3 Comp3D (S.Douche [2002], Y.Egels [2003]) 7

1.1.3 Bilan et premier choix de logiciel pour l'étude comparative 8

1.2 Caractéristiques et possibilités offertes par les différents logiciels retenus 9

1.2.1 Le niveau Utilisateur 9

1.2.1.1 Les modes de calcul 9

1.2.1.1.1 Pré-analyse, simulation 9

1.2.1.1.2 Calcul libre, libre-ajusté, ou contraint 10

1.2.1.2 La recherche d'erreurs : compensation robuste 10

1.2.1.3 Les données 11

1.2.1.3.1 Les fichiers d'entrée et de sortie 11

1.2.1.3.2 Les coordonnées acceptées 11

1.2.1.3.3 Les observations acceptées 12

1.2.1.4 Modélisation de la mise en station 12

1.2.2 Niveau Calculs & Résultats 13

1.2.2.1 Modèles d'ajustement 13

1.2.2.1.1 2D+1 ou 3D 13

1.2.2.1.2 Le modèle de compensation 14

1.2.2.2 Le calcul des coordonnées approchées 14

1.2.2.3 Corrections des observations 14

1.2.2.4 Eléments statistiques de validation de l'ajustement 15

1.2.2.4.1 Test global 15

1.2.2.4.2 Indicateurs de précision 15

1.2.2.4.3 Indicateurs de fiabilité 15

1.2.2.5 Module de visualisation 16

1.2.3 Tableau récapitulatif des caractéristiques 16

1.3 Bilan de l'état de l'art 18

Partie 2 : Notions Théoriques 19
2.1 Rappel sur la méthode de compensation par les intermédiaires 19
2.1.1 Modèle fonctionnel 19
2.1.2 Modèle stochastique 20
2.1.3 Modèle mathématique 21
2.2 La compensation robuste 21
2.2.1 Caractéristiques de la compensation robuste 22
2.2.1.1 Modèle stochastique 22
2.2.1.2 Modèle fonctionnel 22
2.2.1.3 Le point de rupture 22
2.2.2 La compensation robuste sous LTOP 23
2.2.2.1 L'estimateur de Huber 23
2.2.2.2 La fonction d'influence 24
2.2.2.3 Méthode de calcul 25
2.3 Les éléments de validation d'un ajustement 25
2.3.1 Rappels 25
2.3.2 Les indicateurs de précision 26
2.3.2.1 Ellipse d'erreur moyenne d'un point 26
2.3.2.2 Erreur moyenne linéaire d'un point 27
2.3.2.3 Ellipsoïde d'erreur moyenne 28
2.3.3 Les indicateurs de fiabilité 28
2.3.3.1 La fiabilité des observations 28
2.3.3.1.1 Indicateurs de fiabilité locale 28
2.3.3.1.2 L'erreur résiduelle normée 29
2.3.3.1.3 Grandeur d'une faute probable non détectée 30
2.3.3.1.4 Fiabilité interne ∇l_i 30
2.3.3.2 La fiabilité externe 31
2.4 Conclusion 32
Partie 3 : Calculs comparatifs sur les logiciels LTOP, TRINET+ et Comp3D 33
3.1 Présentation des réseaux 33
3.1.1 Le réseau primaire 33
3.1.2 Le réseau secondaire 33
3.2 Calculs comparatifs sur le réseau secondaire 34
3.2.1 Remarques préalables 34
3.2.2 Compensation sans faute 35
3.2.2.1 Analyse des jeux de coordonnées 35
3.2.2.2 Analyse des indicateurs de précision 36
3.2.2.3 Analyse des indicateurs de fiabilité externe 37
3.2.2.4 Analyse visuelle 38
3.2.3 Introduction de fautes dans les observations 39
3.2.3.1 Compensation avec faute minime 40
3.2.3.1.1 Résultats 40
3.2.3.1.2 Analyse des fichiers de résultats 41
3.2.3.2 Compensation avec fautes combinées 42
3.2.3.2.1 Résultats 42
3.2.3.2.2 Analyse des fichiers de résultats 43
3.3 Conclusion de l'étude comparative 44

Partie 4 : Expériences et Analyses 45
4.1 Présentation de la chaîne de traitement actuelle 45
4.1.1 Processus de traitement 45
4.1.2 L'application TopTools 46
4.2 Test et évaluation de la chaîne de traitement 47
4.2.1 Réseau "Conduite Forcée" 47
4.2.1.1 Plan de réseau 47
4.2.1.2 Conditions de lever 49
4.2.1.3 Contraintes de calcul 49
4.2.1.4 Résultats 49
4.2.2 Réseau « Descente de point » 49
4.2.2.1 Plan de réseau 49
4.2.2.2 Conditions de lever 50
4.2.2.3 Contraintes de calcul 51
4.2.2.4 Résultats 51
4.3 Bilan et propositions d'optimisation de la chaîne de traitement 51
Partie 5 : Développements 53
5.1 Cahier des charges 53
5.1.1 Classification des axes de développement informatique 53
5.1.2 Nouvelle chaîne de traitement 54
5.1.3 Enjeux du développement de TopTools pour TPLM-3D 55
5.2 Le langage de programmation C++ 55
5.3 Algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées 55
5.3.1 Définition des objectifs 55
5.3.2 Structure générale de l'algorithme 56
5.3.3 Topologie du réseau 57
5.3.4 Les méthodes de calcul retenues 57
5.3.4.1 Pour l'altimétrie du réseau 57
5.3.4.2 Pour la planimétrie du réseau 57
5.3.5 Notions de contrôle et de fiabilité de détermination des points approchés 60
5.3.5.1 Contrôle des observations réduites 60
5.3.5.2 Contrôle global du réseau de dénivelées partielles 60
5.3.5.3 Contrôle local des observations angulaires et de distances horizontales 60
5.3.5.4 Niveau de fiabilité de détermination des points approchés 61
5.3.6 Tests et validation de l'algorithme 61
5.4 Bilan 62
Conclusion et Perspectives 63
Table des illustrations 64
Bibliographie 65

Introduction

TPLM-3D[1] est une société née en 2004, créée avec l'objectif d'utiliser une technologie novatrice, la lasergrammétrie, au service de multiples secteurs d'activités : le BTP, l'industrie, l'architecture et le patrimoine, etc. Souhaitant offrir des prestations adaptables aux besoins toujours plus spécifiques de ses clients, TPLM-3D investit chaque année dans l'innovation et la recherche pour proposer des produits et services de qualité. Cette démarche s'inscrit pleinement dans un cadre de *Recherche et Développement.* Ce domaine d'activités a permis à TPLM-3D de créer et d'améliorer, au cours de ces dernières années, ses propres outils, avec le concours de stagiaires ingénieurs de divers horizons.

Dans le cadre de son activité, TPLM-3D effectue régulièrement des chantiers qualifiés de « spéciaux », qui supposent la réalisation de travaux topographiques de précision dans des conditions très particulières. Lors de ces chantiers, il s'agit de lever des polygonales classiques ou des réseaux de points, mais avec des contraintes fortes, tels que des espaces restreints lors de chantiers en tunnel, ou encore des visées proches du zénith lors d'auscultation d'ouvrages d'art.

Ces travaux pouvant être effectués de nuit et/ou avec l'existence de co-activité, les conditions de travail ne sont pas toujours favorables à une bonne exécution des mesures. Ainsi, ces chantiers imposent la mise en place de figures géométriques complexes, avec des observations peu redondantes pour l'implantation de réseaux de points. La conservation d'une précision et d'une fiabilité homogènes sur tout le réseau devient alors ardue et nécessite l'utilisation d'un logiciel spécialisé de compensation et d'analyse.

TPLM-3D a donc choisi, pour traiter ces chantiers, le logiciel de compensation de mesures topographiques dénommé LTOP. Ce logiciel, développé par Swisstopo[2], dispose de nombreux outils permettant une bonne analyse des observations terrain et des résultats des calculs. LTOP propose notamment un outil très intéressant : le calcul robuste. Cette adaptation du principe des moindres carrés permet de détecter très facilement des fautes dans les observations ou dans les points d'appui.

LTOP est donc un logiciel extrêmement configurable, qui propose un grand nombre d'options de calcul à l'utilisateur, mais avec une interface peu conviviale. Son utilisation n'est donc pas très intuitive. TPLM-3D a donc choisi de faire du travail préalable requis pour intégrer ce logiciel puissant à ses méthodes de travail, le sujet d'un projet de fin d'études.

Le principal objectif de ce projet de fin d'études est de proposer des solutions pour intégrer efficacement ce logiciel aux processus internes de calcul de l'entreprise d'accueil. À terme, la chaîne de traitement mise en place devra faciliter le travail des ingénieurs et techniciens de TPLM-3D. L'aboutissement de ce projet passe donc par la réalisation de trois grands objectifs :

- La réalisation d'une étude préalable des logiciels similaires à LTOP, afin de valider le choix de TPLM-3D.

[1] ToPographie Lasergrammétrie Modélisation 3D
[2] Swisstopo anciennement dénommé Office Fédéral de Topographie

- L'ajout de fonctionnalités à une application issue de développements internes : TopTools (©TPLM-3D), pour faciliter et simplifier la compensation d'un réseau sous LTOP.
- L'écriture d'un mode opératoire pour le calcul de compensation d'un réseau de mesures sous LTOP et le contrôle des résultats.

Une première partie de ce mémoire intitulée *Etat de l'art*, permettra de réaliser un inventaire non exhaustif des logiciels de compensation disponibles à la vente, ou en utilisation pour des travaux de recherche. La sélection de quelques logiciels, pour confronter leurs caractéristiques, sera l'occasion d'établir le profil d'un logiciel de compensation spécialisé, afin de mieux saisir les concepts importants intégrés dans ces programmes de calcul.

Dans une seconde partie, intitulée *Notions théoriques*, on exposera quelques éléments théoriques offrant au lecteur des clefs pour la compréhension des caractéristiques particulières et principes mathématiques exposés précédemment. Cette partie permettra aussi de fixer les notations de certains concepts, appelés à plusieurs reprises dans le corps de ce mémoire.

Dans une troisième partie, on étudiera les logiciels LTOP (objet de ce projet de fin d'études), TRINET+ et Comp3D sur la base de calculs comparatifs sur un réseau de points. On testera, lors de ces calculs, les différentes fonctions offertes à l'utilisateur pour la validation des résultats d'un ajustement, ainsi que les fonctions particulières propres à chaque logiciel. La conclusion de cette partie permettra de répondre au premier objectif fixé pour ce projet de fin d'études : la validation du choix du logiciel LTOP par TPLM-3D.

Enfin, pour répondre aux deux autres objectifs fixés - l'ajout de fonctions à l'application TopTools et l'écriture d'un mode opératoire - la quatrième partie de ce mémoire intitulée *Expériences et analyses* présentera une étude de test et d'évaluation portant sur la chaîne de traitement informelle mise en place dans les procédures de TPLM-3D. Les résultats de cette étude permettront d'établir un cahier des charges des développements informatiques nécessaires à l'optimisation de la chaîne de traitement. Celui-ci est exposé dans la dernière partie intitulée *Développements*.

Partie 1 : Etat de l'Art

Il existe un grand nombre de logiciels de calculs topographiques sur le marché actuel. Ces logiciels disposent de multiples fonctions de calcul et d'aide au dessin et à la conception de projets impliquant des mesures topographiques. Ils sont majoritairement utilisés par des bureaux d'études, des cabinets de géomètres topographes, ou des organismes publics.

La plupart de ces logiciels disposent de fonctions diverses de calculs topographiques tels que : le calcul de MNT, les transformations de coordonnées, le calcul de points par des méthodes classiques (relèvement, intersection, etc.), le calcul de points rayonnés, etc. Cependant, ils ne permettent pas tous de calculer un réseau de points globalement, en utilisant une méthode de compensation. Ainsi, on s'intéressera plus particulièrement dans cette partie, aux programmes qui utilisent une méthode d'ajustement global pour traiter les observations.

Cet « état de l'art » a donc pour objet de réaliser l'inventaire non exhaustif des logiciels d'ajustements de mesures topographiques, afin d'en confronter leurs caractéristiques et possibilités avec celle du logiciel LTOP, sujet de ce projet de fin d'études.

1.1 Inventaire des logiciels d'ajustements de mesures topographiques

L'inventaire ne recense évidemment pas l'ensemble des logiciels de compensation. Cela aurait nécessité plusieurs mois supplémentaires, et ce n'est pas l'objectif premier de ce projet de fin d'études.

Une étude bibliographique simplifiée permet de définir deux classes de logiciels : les commerciaux et ceux issus de la recherche.

1.1.1 Les logiciels commerciaux

1.1.1.1 LTOP (E. Gubler [2003])

- Brève présentation[3]

La première version du logiciel LTOP est développée dans les années 1970 par l'Office Fédérale de Topographie (OFT), aujourd'hui dénommé Swisstopo. L'auteur principal est Erich Gubler, ancien directeur de l'OFT. Il a créé ce logiciel en collaboration avec de nombreux scientifiques de l'OFT et de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.

À l'origine, ce programme a été développé pour les besoins de l'OFT en matière de triangulation de canevas géodésiques et d'auscultation de barrages. Il n'est proposé à la vente qu'à partir de 1985, d'abord à quelques cantons, puis aux bureaux privés. C'est aujourd'hui le logiciel de la Mensuration Officielle Suisse (Organisme public qui gère la fixation des limites entre parcelles et garantit la propriété foncière).

[3] L'historique de LTOP a été établi sur la base d'un échange de courriel avec le Dr. Urs Marti, responsable des développements de logiciels géodésiques chez Swisstopo.

- Utilisation de LTOP

LTOP permet de réaliser la compensation d'observations issues de différents instruments topographiques : coordonnées GPS, distances, gisements/azimuts, tour d'horizon, dénivelées.

Ces observations peuvent être compensées selon deux méthodes : l'une employant le principe des moindres carrés et l'autre le principe de la compensation robuste. La méthode de compensation robuste permet de détecter les fautes grossières et de réduire leur influence sur les résultats.

Ce logiciel propose aux utilisateurs la possibilité d'effectuer des calculs de pré-analyse et de compensation planimétrique et altimétrique séparés. Il offre aussi de nombreux indicateurs de fiabilité et de qualité pour la vérification des calculs.

1.1.1.2 TRINET+ (S. Guillaume et Al. [2008], P.H. Cattin [2007])

- Brève présentation

Ce logiciel est issu de travaux de diplômes au sein des spécialités Géomatique des écoles d'ingénieurs Hes·so de Muttenz et Heig-Vd d'Yverdon-les-bains (Suisse). À l'origine, ce logiciel, dénommé alors TRINET, ne permettait d'effectuer qu'un calcul de pré-analyse. Dans le cadre d'un projet de recherche à Heig-Vd, il s'est doté du nouveau nom TRINET+ suite à l'implémentation de la compensation 3D et d'un module de visualisation.

- Utilisation de TRINET+

TRINET+ offre de nombreuses possibilités aux utilisateurs. Il permet notamment de combiner des observations GNSS avec des observations topographiques classiques (angles et distances). Il dispose de nombreuses options pour affecter des erreurs moyennes aux observations. Il met à disposition des utilisateurs de nombreux indicateurs de précision et de fiabilité.

Ce logiciel a été utilisé et optimisé dans le cadre d'un projet du laboratoire G2C de Heig-Vd. Ce projet, intitulé « Auscultation: Surveillance topométrique tridimensionnelle d'ouvrages d'art », a permis de valider le modèle de compensation 3D du logiciel, et de tester la méthodologie pour la détection et l'évaluation de mouvements sur un ouvrage d'art.

Ce logiciel est aujourd'hui commercialisé dans les bureaux d'études et cabinets de géomètre suisses.

1.1.1.3 Leica GeoMos (Leica@ [2012])

- Brève présentation

Leica GeoMos est un logiciel de surveillance et d'analyse développé par la société Leica Geosystems. Il dispose de deux applications: *Monitor*, qui permet de gérer l'acquisition des données et de contrôler les mesures et le pilotage des instruments ; *Analyser*, qui offre des outils d'analyse et de post-traitement (ajustement) des données, et permet aussi de visualiser graphiquement les résultats des mesures dans le cas d'analyse de déformations.

- Utilisation de GeoMos

Cette suite logicielle complète est très utilisée pour des chantiers d'auscultations, des analyses de déformations, la détection de glissements et d'affaissement de terrain ou encore les levers automatisés.

Elle a l'avantage de combiner des mesures issues de différents instruments, tels que : des stations totales, des systèmes GPS, des sondes météorologiques, des sondes géotechniques, etc. Son module d'ajustement de mesures permet de détecter et d'écarter les aberrations et fautes dans les mesures, grâce à une méthode de compensation robuste. De nombreux indicateurs statistiques permettent aussi de détecter les points instables dans un réseau.

1.1.1.4 Trimble Geomatics Office (Trimble@ [2012])

- Brève présentation

Trimble Geomatics Office (TGO) est un système complet de traitement de données topographiques. Il offre de nombreuses fonctionnalités telles que : le traitement de données GPS, le calcul de courbes de niveaux et de MNT, les transformations de coordonnées, l'ajustement de réseaux de points avec le module *Network Adjustment*... etc.

- Utilisation de TGO

Le module *Network Adjustment* permet de combiner des observations GPS et terrestres. Il permet d'effectuer deux types d'ajustement : libre et contraint. L'ajustement libre permet à l'utilisateur de contrôler les observations et de détecter d'éventuelles erreurs. L'ajustement contraint réalise la compensation finale d'un réseau, lorsque toutes les observations fausses ont été écartées et que le choix des points fixes a été effectué par l'utilisateur. TGO offre aussi de nombreux indicateurs statistiques pour le contrôle et la validation d'un réseau de points.

1.1.1.5 GeoLab (Bitwise Ideas@ [2012])

- Brève présentation

Ce logiciel complet d'ajustement de mesures topographiques a été développé au Canada par le Dr. Robin Steeves en 1982 pour l'ajustement du réseau géodésique canadien. Dès 1985, il été commercialisé auprès des professionnels de la géomatique. Il est aujourd'hui utilisé dans le monde entier.

- Utilisation de GeoLab

GeoLab réalise des compensations par les moindres carrés et des calculs de pré-analyse sur des réseaux géodésiques, ainsi que des polygonales. Il est capable de gérer des mesures topographiques classiques et des mesures GPS. Il est aussi performant pour l'ajustement de réseaux géodésiques que pour celui de petits cheminements polygonaux.

Ce logiciel, extrêmement configurable, s'adapte à toutes sortes de projets. Il offre de nombreuses possibilités de contrôle des données et des calculs : ellipses d'erreur, régions de confiance, et bien d'autres outils statistiques.

1.1.1.6 Covadis (Geomedia@ [2012])

- Brève présentation

Covadis est un logiciel de topographie générale développé, depuis 1993, par la société GEOMEDIA SA. C'est un applicatif pour AutoCAD qui permet d'effectuer de nombreux calculs topographiques pour des projets de types variés : VRD (Voirie et Réseaux Divers), terrassement (calcul et analyse de modèles numériques de terrain), conception 3D, projets de lotissements, calculs de réseaux de nivellements, de polygonales, de triangulation…

Covadis est très répandu chez les géomètres experts et dans les bureaux d'études. GEOMEDIA annonce plus de 4200 utilisateurs en Europe pour environ 16300 licences installées.

- Utilisation de Covadis

Sous Covadis, il est possible d'ajuster des réseaux de mesures topographiques à l'aide d'une fonction de compensation appelée "CALCUL EN BLOC". Cependant, très peu d'indicateurs de fiabilité et de qualité sont mis à disposition de l'utilisateur pour contrôler les observations et détecter d'éventuelles erreurs.

1.1.1.7 Azitop (Azimut@ [2004])

- Brève présentation

Azitop est un module de la suite logicielle G-OFFICE développée par la société AZIMUT. C'est un applicatif pour les logiciels de DAO MicroStation® et PowerDraft™ V8. Il regroupe de nombreuses fonctions similaires au logiciel Covadis pour Autocad.

La société AZIMUT développe cet ensemble d'applications depuis une dizaine d'années en partenariat avec de nombreuses entreprises du monde de la topographie tels que Bentley, Générale d'Infographie, etc.

- Utilisation de Azitop

AZITOP est composé d'un ensemble de fonctions de calculs et de traitement de données topographiques pour les géomètres utilisant MicroStation®. Il dispose de fonctions similaires à Covadis pour l'édition et la modification de carnets de terrain.

La méthode de compensation par les moindres carrés a été implémentée dans AZITOP afin de pouvoir calculer des cheminements, ou des réseaux de points. AZITOP réalise, comme Covadis, une compensation en bloc par les moindres carrés en X, Y et Z. Il permet aussi à l'utilisateur d'analyser la cohérence des résultats et de rechercher des erreurs dans les observations.

1.1.2 Les logiciels issus de la recherche et non commercialisés

1.1.2.1 LGC "Logiciel Général de Compensation" (M.Jones [2002], M. Mayoud et Al. [1988])

- Brève présentation

LGC est un logiciel développé au CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) dans les années 1980, initialement dans le langage FORTRAN 77 puis traduit en langage C. C'est un programme complet pour le traitement des observations topographiques sur les réseaux tridimensionnels de points implantés dans le système géodésique propre au CERN.

Au fil des versions, de nombreux ajouts ont été effectués pour permettre à ce logiciel d'ajuster des mesures provenant de différents types d'instruments : théodolites, stations totales, niveaux, gyroscope, distinvar… LGC permet d'effectuer des calculs de pré-analyse et fournit à l'utilisateur un grand nombre d'indicateurs statistiques pour contrôler la fiabilité et la qualité des réseaux.

- Utilisation de LGC au CERN

Le CERN dispose du plus grand accélérateur de particules construit dans le monde : le *Large Hadron Collider* (LHC, en français, « grand collisionneur de hadrons »). Tout comme l'anneau de stockage de l'ESRF, l'alignement des composants et machines du LHC doit être régulièrement contrôlé. Le logiciel LGC permet donc de traiter l'ensemble des mesures effectuées sur ces machines et offre de nombreuses possibilités pour les calculs d'analyse de déformations.

1.1.2.2 GCP "Global Compensation Program"

- Brève présentation

Ce logiciel a été développé au sein du groupe ALGE (Alignement and Geodesy) de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) par M. Gilles Gatta. GCP a été programmé en langage LABVIEW sur la base du logiciel LCG du CERN.

Il permet d'effectuer des calculs de compensation par les moindres carrés par la méthode des intermédiaires en planimétrie puis en altimétrie (2D+1).

Ce logiciel propose aussi de nombreuses fonctions pour le contrôle des calculs et la détection d'erreur. Le travail de fin d'études de Geoffroy Emain [2006] offre un aperçu des nombreuses fonctionnalités de GCP développées pour répondre aux besoins de l'ESRF.

- Utilisation de GCP à l'ESRF

L'ESRF abrite de nombreuses machines permettant de faire circuler une lumière synchrotron composée d'électrons de haute énergie, au sein d'un anneau de stockage.

Le groupe ALGE intervient principalement lors de l'arrêt temporaire des machines, pour des campagnes de mesures topographiques. L'objectif de ces missions est de contrôler l'alignement des machines, de détecter les éventuelles variations d'altitudes, d'implanter de nouvelles machines, ou encore d'ausculter les différents aimants répartis dans l'ensemble de l'anneau de stockage pour focaliser l'énergie.

Tous ces travaux topographiques demandent une précision extrême. Ils doivent permettre de détecter la moindre variation de forme du réseau de machines de l'anneau de stockage (forme théorique : cercle). Cependant, la qualité des observations et des levers effectués est souvent très influencée par des mises en stations périlleuses, et l'activité des aimants qui créée un champ magnétique peut perturber les mesures (Chaurand R. [2011]).

On comprend bien la nécessité, pour le groupe ALGE, de développer un logiciel permettant de contrôler des mesures topographiques et de détecter des erreurs, avant d'effectuer une compensation.

1.1.2.3 Comp3D (S.Douche [2002], Y.Egels [2003])

- Brève présentation

Comp3D est un programme de compensation qui permet d'ajuster simultanément des observations planimétriques et altimétriques. Il a été développé par M. Yves Egels, enseignant-chercheur à l'ENSG, pour des applications de métrologie à l'IGN.

Ce logiciel effectue des calculs de pré-analyse et de compensation définitive. Le module CAP permet de calculer les coordonnées approchées d'un réseau de points. Il effectue des calculs d'indicateurs statistiques de fiabilité et de qualité pour faciliter l'interprétation des résultats et le contrôle des observations.

- Utilisation de Comp3D

Une utilisation de cette suite logicielle est présentée dans le travail de fin d'études de Sébastien Douche [2002] portant sur la mise en place d'une procédure pour contrôler la dégradation des carneaux déflecteurs (ouvrages en béton destinés à diriger et évacuer les flammes et résidus de combustion lors d'un décollage de fusée) de la base de lancement de Kourou en Guyanne. Cette étude a été réalisée en collaboration avec le Groupe Topographie du Centre Spatial Guyannais. Elle a nécessité la densification d'un canevas géodésique local, qui a été calculé et dont la précision effective a été contrôlée avec Comp3D.

1.1.3 Bilan et premier choix de logiciel pour l'étude comparative

Les logiciels présents dans cet inventaire ont été regroupés en deux catégories : commerciaux ou non. On aurait pu, d'après une étude rapide de leurs caractéristiques, les regrouper en trois autres catégories :

- Les applicatifs : des logiciels complets pour des calculs topographiques classiques, qui offrent des outils d'aide au dessin intéressants.
- Les suites logicielles, qui disposent de nombreuses fonctions particulières - dont la possibilité de compenser un réseau.
- Les logiciels de compensation, dont l'unique destination est d'ajuster un réseau de points à partir de mesures topographiques.

Catégories	**Logiciels**
Applicatifs	Covadis, Azitop
Suites logicielles	Leica GeoMos, Trimble Geomatics Office
Logiciels de compensation	LTOP, TRINET+, GeoLab, Comp3D, LGC, GCP

Tableau 1: Trois différentes catégories de logiciels

Le Tableau 1 présente les logiciels de l'inventaire établi, regroupés sous les trois catégories décrites précédemment.

Dans le paragraphe suivant, nous confronterons les caractéristiques du logiciel LTOP avec d'autres logiciels choisis dans l'inventaire précédent. Nous tenterons, après analyse de chaque programme, de dégager et de classer les caractéristiques et possibilités offertes par un programme de compensation de mesures topographiques.

Notre choix de logiciels entre exclusivement dans la catégorie « Logiciels de compensation » puisque ce projet de fin d'études porte sur cette catégorie. Les logiciels TRINET+ et Comp3D ont été sélectionnés car des licences temporaires ont été mises à notre disposition le temps de l'étude. Enfin, nous avons retenu GeoLab car c'est l'un des logiciels les plus répandus sur le marché actuel et qu'il offre de nombreuses fonctionnalités pour traiter tous types de données topographiques.

Nous pouvons déjà noter que, parmi les logiciels retenus, trois sont commercialisés et un ne l'est pas. Les logiciels LTOP et GeoLab sont distribués à grande échelle et TRINET+ à plus petite échelle. Il est même encore en période de validation auprès de quelques clients. Quant à Comp3D, il a été mis à la disposition de TPLM-3D gracieusement le temps de ce projet de fin d'études, par M. Yves Egels, enseignant chercheur à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques et développeur de ce programme de compensation.

1.2 Caractéristiques et possibilités offertes par les différents logiciels retenus

L'objectif de ce paragraphe est d'établir un inventaire des possibilités offertes par un logiciel d'ajustement de mesures topographiques à partir de la confrontation des logiciels retenus pour l'étude comparative. Il ne s'agit pas d'établir le profil idéal d'un bon logiciel de compensation, mais d'établir une classification des caractéristiques principales de ce type de logiciels, sur la base de l'analyse de LTOP, TRINET+, GeoLab et Comp3D. Cela permettra de mieux saisir les concepts importants intégrés dans ce type de logiciels.

Dans ce paragraphe, nous identifierons simplement les caractéristiques de ces logiciels en les regroupant en deux sous-paragraphes : niveau *Utilisateur* et niveau *Calculs & Résultats*.

Chaque caractéristique sera décrite sur la base des informations recueillies dans les divers manuels d'utilisateurs des logiciels.

Les notions théoriques permettant de mieux comprendre et appréhender les fonctions particulières des logiciels de compensation feront l'objet d'une seconde partie dans ce mémoire.

1.2.1 Le niveau Utilisateur

Le niveau *Utilisateur* rassemble les caractéristiques principales d'un logiciel, permettant de configurer et d'initialiser un calcul de compensation. Cela correspond, en partie, aux paramètres d'un logiciel que l'utilisateur peut directement modifier. Dans cette section, on décrira aussi les caractéristiques liées à l'interaction entre l'utilisateur et le logiciel.

1.2.1.1 Les modes de calcul

1.2.1.1.1 Pré-analyse, simulation

Les logiciels LTOP, TRINET+, GeoLab et Comp3D proposent une option de calcul de pré-analyse.

Cette fonction permet de réaliser un calcul de compensation avant de disposer d'observations effectives. On peut ainsi calculer des ellipses d'erreurs et de nombreux indicateurs de fiabilité pour chaque point nouveau du réseau fictif (à condition que les erreurs moyennes, a priori, soient les plus proches possibles des conditions de lever).

Ce calcul de simulation, réalisé avant d'effectuer un lever sur le terrain, peut être très utile pour tester la stabilité d'un réseau. Aussi, on pourra suivant les résultats de la pré-analyse, optimiser la configuration du réseau (diminuer par exemple le nombre de mesures prévues si le degré de surabondance est suffisamment important).

Cet outil de pré-analyse peut donc être très intéressant pour les études préalables à une intervention sur le terrain. Il peut permettre de gagner du temps et de l'argent tout en maintenant le niveau de fiabilité et de qualité requis dans le cahier des charges.

1.2.1.1.2 Calcul libre, libre-ajusté, ou contraint

Les logiciels LTOP et TRINET+ proposent trois modes de calcul différents : un calcul libre, libre-ajusté ou contraint.

Dans un calcul libre, le positionnement du réseau compensé est réalisé à l'aide d'un point fixe et d'un gisement. Ce calcul permet d'analyser les observations sans l'influence de l'imprécision des points fixes.

Les indicateurs permettant de détecter des fautes dans les observations à l'issue de ce type de compensation sont : les erreurs résiduelles normées w_i, et les grandeurs g_i, qui indiquent la taille probable d'une faute sur une observation.

Le calcul libre-ajusté se fait en utilisant les points de rattachement du réseau comme observations. Cela permet de minimiser, dans un réseau, les contraintes provoquées par les points de rattachement. On peut alors analyser les résidus sur les coordonnées observées de ces points et choisir les meilleurs points pour la compensation définitive.

Le calcul contraint est la dernière étape de la compensation sous TRINET+ et LTOP. Une fois écartées les erreurs et fautes sur les observations et les points de rattachement choisis, l'utilisateur peut effectuer un calcul en considérant certains points de rattachement comme fixes.

Sous Comp3D et GeoLab, ces trois modes de calcul ne sont pas décrits explicitement dans les manuels d'utilisateurs. Cependant, il est possible de définir des points de rattachement comme variables. Cela permet de tester la qualité des points de rattachement, d'écarter les points aberrants et de relancer une compensation définitive. On peut aussi définir un minimum de deux points fixes, similairement au calcul libre, pour analyser les observations dans un réseau très peu contraint.

1.2.1.2 La recherche d'erreurs : compensation robuste

Seul LTOP dispose d'une fonction permettant de rechercher des erreurs facilement. En effet, dans ce logiciel, la compensation dite "robuste" offre la possibilité aux utilisateurs de détecter des fautes et erreurs dans les observations.

Cette méthode, inspirée de la statistique robuste, tient compte du fait que les observations ne sont pas toutes distribuées normalement. Elle permet donc de limiter l'influence des fautes dans la compensation, afin d'obtenir des résultats cohérents avec la précision des observations. On pourra consulter dans la partie 2 intitulée *Notions théoriques*, le paragraphe explicatif sur le modèle de compensation robuste intégré au logiciel LTOP.

Les autres logiciels proposent à l'utilisateur différents indicateurs permettant de détecter des erreurs dans les séries d'observations comme les résidus normés et autres indicateurs de fiabilité.

1.2.1.3 Les données

1.2.1.3.1 Les fichiers d'entrée et de sortie

Chaque logiciel demande, en entrée : des fichiers de paramétrage du calcul, des fichiers d'observations et de coordonnées. Ensuite, en sortie du calcul, chacun propose un listing complet des résultats. L'utilisateur pourra y retrouver, notamment : la liste des coordonnées compensées, les résidus sur les observations, les indicateurs statistiques de qualité et de fiabilité, le nombre d'observations, le nombre d'inconnues…

LTOP et TRINET+ ont leur propre format de fichier d'observations et de coordonnées en entrée : le format **.mes* pour les observations, et le format **.koo* pour les coordonnées des points. Ces deux logiciels ne disposent malheureusement pas de module d'importation de carnet de terrain : Leica, Trimble, Topcon, ou venant d'autres appareils.

LTOP fournit, en sortie, deux fichiers : un fichier **.res,* contenant un listing des coordonnées compensées, et un fichier **.prn* contenant un listing des résultats.

TRINET+ fournit un seul fichier dénommé *Resultate.txt* qui contient un listing complet des coordonnées compensées et des indicateurs statistiques.

Les logiciels GeoLab et Comp3D offrent la possibilité d'importer divers formats de carnet de terrain pour les convertir dans les formats de données d'entrée.

GeoLab demande en entrée un fichier **.iob* (pour « *I*nput *Ob*servation ») qui contient toutes les observations et coordonnées des points du réseau à compenser; ainsi qu'un fichier de paramétrage du calcul : **.gpj.*

Comp3D demande un fichier **.obs* contenant les observations, et un fichier **.cor* contenant les coordonnées des points du réseau à compenser. Il fournit un fichier listing des coordonnées compensées au format **.new,* et un fichier listing des résultats au format **.cmp.*

1.2.1.3.2 Les coordonnées acceptées

	LTOP	TRINET+	GeoLab	Comp3D
Coordonnées locales	Oui, cas particulier	Oui, cas particulier	Oui, cas particulier	Oui
Coordonnées cartésiennes selon une projection	Oui	Oui	Oui	Oui, cas particulier
Coordonnées géocentriques	Oui	Oui	Oui	Non
Coordonnées géographiques	Oui	Oui	Oui	Non
Coordonnées topocentriques	Non	Oui	Non	Non

Tableau 2: Coordonnées acceptées par les logiciels

Le Tableau 2 présente les différentes catégories de coordonnées, qui sont acceptées en entrée des logiciels.

Les cinq logiciels permettent la compensation des coordonnées locales. Cependant, GeoLab fonctionne de manière particulière : il ne compense que les coordonnées planimétriques locales et ne prend pas en compte la composante verticale. Les logiciels LTOP et TRINET+ ne permettent pas la compensation directe de coordonnées locales. Sous LTOP, il faut modifier la définition du point fondamental de la projection pour s'affranchir de l'influence des déformations et réductions dues à la projection. Sous TRINET+, il faut travailler avec des coordonnées topocentriques[4].

LTOP permet la compensation de coordonnées cartésiennes selon certaines projections : le système de projection suisse, les systèmes allemands et français. TRINET+ ne traite que des coordonnées dans la projection suisse MN95. Comp3D considère que toutes les projections sont équivalentes au premier ordre pour une zone assez petite. Il les traite donc indifféremment des coordonnées locales (C.Guérin [2010]). Seul GeoLab permet la définition stricte de n'importe quel système de projection.

Contrairement aux autres logiciels, Comp3D ne prend pas en charge la compensation des coordonnées géocentriques et géographiques.

1.2.1.3.3 Les observations acceptées

Le Tableau 3 présente un récapitulatif des différentes catégories d'observations qui sont acceptées par les logiciels.

On constate que seul Comp3D ne permet pas l'intégration de mesures GPS dans un calcul de compensation. En revanche, il gère les données Images et Laser pour de la triangulation photographique et du calage de station laser scanner (Y. Egels [2003]).

	LTOP	**TRINET+**	**GeoLab**	**Comp3D**
Observations topographiques classiques (angles, distances)	Oui	Oui	Oui	Oui
Mesures de Nivellement Direct	Oui	Oui	Oui	Oui
Données GPS	Oui	Oui	Oui	Non
Données Images (Coord. Images Points + Eléments Orientation Interne)	Non	Non	Non	Oui
Données Scanner Laser	Non	Non	Non	Oui

Tableau 3: Observations acceptées par les logiciels

1.2.1.4 Modélisation de la mise en station

TRINET+ dispose d'une fonction intéressante qui permet de définir les hauteurs d'instruments et de signal comme des observations. Cela permet de réduire le problème de corrélation entre les observations, dû aux erreurs de centrage et de mesure de hauteurs d'instrument et de signal. TRINET+ peut aussi utiliser un modèle standard.

[4] L'origine du système topocentrique est définie au centre des stations de mesure. L'axe des Y, suivant le Nord astronomique, l'axe des X suivant l'Est astronomique, l'axe Z opposé au vecteur de pesanteur.

Les logiciels LTOP et GeoLab modélisent la mise en station de manière standard. Ils définissent en amont de la compensation les erreurs de mesure de hauteurs d'instrument et de signal, ainsi que les erreurs de centrage. Toutes ces erreurs sont prises en compte dans le modèle stochastique de la compensation.

Aucune information n'est précisée à ce sujet dans le document descriptif du logiciel Comp3D.

1.2.2 Niveau Calculs & Résultats

Le niveau *Calculs & Résultats* regroupe les principales caractéristiques d'un logiciel relatives aux méthodes de calcul employées et aux outils statistiques qui permettent l'analyse des résultats d'un ajustement.

1.2.2.1 Modèles d'ajustement

1.2.2.1.1 2D+1 ou 3D

Le logiciel LTOP réalise un calcul de compensation des observations en 2D+1. Ainsi, lors d'un calcul, la compensation des observations planimétriques est séparée de celles des observations altimétriques. Les autres logiciels (TRINET+, GeoLab et Comp3D) compensent simultanément toutes les observations d'un réseau. On parle dans ce cas de compensation tridimensionnelle.

Dans une compensation tridimensionnelle (calcul 3D), les inconnues sont traitées simultanément dans le calcul. Ainsi, les erreurs accidentelles sur les angles verticaux influent sur les angles horizontaux et les distances.

Ce type de calcul est utilisé en métrologie où les visées sont courtes (Manuel Covadis [2005]). Ainsi, si l'on choisit de compenser un réseau par un ajustement tridimensionnel, le professeur P-H. Cattin [2011] préconise de porter une attention particulière à la mesure des angles verticaux et des hauteurs d'instruments et de signal. Cela garantit une précision tridimensionnelle plus homogène.

Par ailleurs, Stéphane Durand [2009a] indique que le traitement en trois dimensions est plus approprié pour la compensation d'observations issues des techniques de mesure modernes, tel que le GPS.

La différence entre les modèles d'ajustement 2D+1 et 3D s'observe lorsque l'on compense un réseau lui-même en 3D (par exemple dans les cas d'auscultation d'ouvrage d'art, ou de travaux topographiques en zone montagneuse). Dans ces conditions, deux visées d'intersection issues de stations à des altitudes différentes peuvent créer en planimétrie un angle d'intersection très faible et défavorable. Le calcul en 2D+1 donnera des coordonnées planimétriques peu précises et peu fiables (d'après une analyse des indicateurs de précision et de fiabilité), et influencera la détermination de l'altitude du point. En revanche, dans un calcul 3D, ces mêmes visées s'intersectent très bien. La précision et la fiabilité des coordonnées tridimensionnelles du point seront donc mieux estimées.

Dans le cas d'un calcul 3D, la compensation d'un réseau est effectuée directement à partir des observations réelles (distance oblique *di*, angles horizontaux *hz* et verticaux *av*). Dans un calcul 2D+1, ce n'est pas le cas.

En effet, les distances obliques entre points sont réduites dans le plan de projection, compensées, puis considérées comme théoriques lors du calcul altimétrique (Manuel Covadis [2005]). Le calcul 3D présente donc un avantage, puisque la précision d'insertion des points nouveaux dans un réseau est plus homogène.

1.2.2.1.2 Le modèle de compensation

Les logiciels LTOP, GeoLab et Comp3D réalisent une compensation des observations par les moindres carrés en utilisant la méthode des intermédiaires.

Le logiciel TRINET+ utilise la méthode des intermédiaires avec conditions. P.H. Cattin, [2012] rappelle dans son cours que Helmert est à l'origine de l'association des méthodes de compensation par les intermédiaires et les conditionnelles. Grâce à cette méthode, l'utilisateur de TRINET+ peut, par exemple, introduire dans le calcul une condition de distance entre deux points d'un réseau. Lors de la compensation du réseau, cette distance reste fixe et les points sont donc contraints.

1.2.2.2 Le calcul des coordonnées approchées

Seuls les logiciels GeoLab et Comp3D permettent le calcul de coordonnées approchées par des méthodes classiques de calculs topométriques (relèvement, intersection, … etc.).

Les logiciels LTOP et TRINET+ sont capables de compenser un réseau de points à partir de coordonnées très approchées relativement à la taille du réseau. En principe, les calculs de compensation de réseaux géodésiques sont toujours rattachés à un système de coordonnées nationales. Les développeurs de LTOP et TRINET+ préconisent par exemple de déterminer les coordonnées approchées d'un point par digitalisation sur une carte.

1.2.2.3 Corrections des observations

Les différents systèmes de projection employés déforment les observations (angles ou distances selon le type de projections). Tous les logiciels appliquent donc des réductions sur les distances et des corrections des cotes du géoïde dite « correction de *dV* ».

Les logiciels LTOP, TRINET+ et GeoLab proposent ces options en paramètres de calcul. Seul Comp3D, considérant que toutes les projections sont équivalentes au premier ordre et sur des réseaux de mesures de petites tailles, ne rend pas ces options de réductions des observations paramétrables par l'utilisateur.

La déviation de la verticale influence les angles verticaux et les distances horizontales. Plus la taille du réseau croît, plus cette influence devient importante.

Il est donc indispensable de prendre en compte la déviation de la verticale, dès qu'un réseau est de l'ordre d'un canevas géodésique. La déviation de la verticale en un point dépend du champ de pesanteur. Elle peut être déterminée selon trois méthodes : par des observations astronomiques, à l'aide d'un modèle de géoïde, ou par une modélisation approximative du champ gravitationnel basé sur un modèle sphérique.

LTOP, TRINET+ et GeoLab prennent en compte l'influence de cette déviation de la verticale, si elle connue de l'utilisateur, en chaque point nouveau d'un réseau. TRINET+ propose aussi de calculer une valeur approchée à partir d'un modèle sphérique. GeoLab dispose de nombreux modèles de géoïde, qui permettent de déterminer la déviation de la verticale.

Comp3D faisant l'hypothèse que le réseau de points à compenser est de petite envergure, il s'affranchit de l'influence de la déviation de la verticale.

La réfraction géodésique a une influence directe sur la mesure des angles verticaux. Chacun des logiciels prend en compte l'influence de cette réfraction selon différents modèles de correction.

1.2.2.4 Eléments statistiques de validation de l'ajustement

1.2.2.4.1 Test global

Le test global permet de vérifier la validité des hypothèses du modèle. En d'autres termes, il permet de tester qu'une variable aléatoire suit une certaine loi.

Les logiciels LTOP, TRINET+ et GeoLab utilisent le test du χ^2. Ce test est effectué sur la valeur du facteur unitaire de variance (l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids a posteriori). Il permet de valider, globalement ou non, la présence de fautes, et le modèle stochastique utilisé (précision a priori des mesures).

Comp3D n'effectue aucun test statistique global. Il fournit seulement la racine carrée de l'estimateur du facteur unitaire de variance (S. Douche [2012]).

1.2.2.4.2 Indicateurs de précision

LTOP fournit à l'utilisateur un moyen de contrôler la précision de la détermination d'un point par le biais d'un intervalle de confiance pour la composante altimétrique, et d'une ellipse de confiance pour la composante planimétrique.

TRINET+ et Comp3D calculent les paramètres d'un ellipsoïde de confiance.

GeoLab peut calculer, selon les paramètres choisis par l'utilisateur, des intervalles de confiance, des ellipses de confiance ou des ellipsoïdes de confiance.

Tous ces indicateurs de la qualité de la détermination permettent de définir une zone, du plan ou de l'espace, dans laquelle un point a une probabilité p de se trouver (p étant le seuil de confiance). Les ellipses de confiance dites *standard* sont calculées avec un seuil fixé à un sigma, soit une probabilité de 39% (resp. les ellipsoïdes de confiances *standard* avec un seuil de confiance de 20%).

1.2.2.4.3 Indicateurs de fiabilité

On distingue deux types d'indicateurs de fiabilité : les indicateurs de fiabilité locale et de fiabilité externe.

Les indicateurs de fiabilité locale permettent d'étudier le comportement local d'un réseau, et donc de détecter des fautes et des faiblesses.

Chacun des logiciels met à la disposition de l'utilisateur deux indicateurs de fiabilité locale, intéressants pour l'analyse des observations. Le premier est l'erreur résiduelle normée, qui permet de vérifier la présence d'une faute sur une observation. Le second est le facteur de redondance partielle, qui permet de vérifier que les observations sont suffisamment contrôlées.

LTOP et TRINET+ sont les seuls logiciels à offrir à l'utilisateur d'autres indicateurs de fiabilité locale permettant de déterminer la taille probable d'une faute lorsqu'une erreur résiduelle normée dépasse la tolérance imposée.

Les indicateurs de fiabilité externe définissent une zone du plan ou de l'espace qui permet d'étudier l'influence d'une faute non détectée sur la position d'un point, dans le cas le plus défavorable.

Seuls LTOP et TRINET+ calculent des régions de fiabilité. LTOP a choisi de représenter cette fiabilité sous forme de rectangle dans le plan, accompagné d'un intervalle de fiabilité pour l'altimétrie. Quant à TRINET+, il donne le plus grand vecteur de fiabilité externe, qui peut être interprété comme une sphère dans l'espace.

1.2.2.5 Module de visualisation

Seuls GeoLab et TRINET+ offrent à l'utilisateur un module de visualisation intéressant pour l'analyse d'un réseau compensé. On peut afficher à une échelle définie les indicateurs statistiques (ellipses d'erreurs, fiabilité) et constater la stabilité du réseau, détecter des faiblesses au niveau de certains points, ou encore la présence d'erreurs.

1.2.3 Tableau récapitulatif des caractéristiques

Le Tableau 4 récapitule les principales caractéristiques des quatre logiciels étudiés.

On retrouve dans l'en-tête du tableau quelques éléments permettant de décrire plus généralement les logiciels tels que : le nom du développeur, le système d'exploitation requis, les langues du logiciel, ou encore une évaluation de l'ergonomie.

L'ergonomie est évaluée subjectivement d'après les différents tests effectués sur chaque logiciel. Le signe « ++ » indique que l'interface est très conviviale, le signe « +/- » indique que l'interface n'est pas simple d'utilisation.

A l'issue de cette confrontation des caractéristiques, on constate que les profils de ces logiciels sont assez semblables. Ils se distinguent les uns des autres soit par les méthodes de calcul utilisées, soit par des fonctions particulières qui apportent une valeur ajoutée aux logiciels. On retiendra trois de ces fonctionnalités intéressantes, qui ne sont pas disponibles dans tous les logiciels : la compensation robuste, le calcul de coordonnées approchées et le module de visualisation.

LTOP est le seul logiciel qui effectue un ajustement en 2D+1, les autres privilégiant un ajustement 3D. Ainsi, les logiciels TRINET+, Comp3D et GeoLab proposent à l'utilisateur l'ellipsoïde de confiance comme indicateur de précision.

Ce dernier permet d'évaluer la précision d'insertion d'un point nouveau dans un réseau tridimensionnel de façon plus homogène que ne le fait la combinaison de l'ellipse et de l'intervalle confiance calculée par LTOP.

Par ailleurs, seuls les logiciels LTOP et TRINET+ intègrent la notion de fiabilité. Or elle permet de fournir des indicateurs précieux pour la validation et l'analyse de la sensibilité des résultats face aux éventuelles fautes non détectables.

	Logiciel	LTOP	TRINET+	GeoLab	Comp3D
	Développeur	swisstopo	HEIG-VD	Bitwise Ideas	Yves Egels – ENSG
	Licence/Prix	4000 CHF + 550 CHF (interface windows)	5000 CHF	1920 $CAD	Non commercialisé
UTILISATEUR	Système d 'exploitation requis	Windows/Dos/Linux	Windows	Windows	Windows
	Langues	Français/Allemand/Anglais	Français/Allemand	Anglais	Français
	Ergonomie	+/-	+/-	+	++
	Préanalyse/Simulation	oui	oui	oui	oui
	Recherche d'erreurs (compensation robuste)	oui	non	non	non
	Types de compensation				
	libre, libre ajusté, contrainte	oui	oui	cas particulier	cas particulier
	Limitation du nombre de points	non	non	non	non
	Données				
	entrée	*.dat, *.mes, *.koo	*.mes, *.csv (format TRINET+)	*.iob, *.gpj	*.cor, *.obs
	sortie	*.res, *.prn	*.txt	*.lst	*.cmp, *.new
	Formats de carnets de terrain gérés	*.mes (Format LTOP)	*.mes, *.csv (format TRINET+)	LEICA, TRIMBLE, TOPCON, …	LEICA, TRIMBLE, TOPCON, …
	Modélisation de la mise en station	standard	physique ou standard	standard	-
CALCULS & RESULTATS	Modèles d'ajustement				
	Fonctionnel	intermédiaires	intermédiaires avec conditions	intermédiaires	intermédiaires
	3D, 2D+1	2D+1	3D	3D et 2D+1	3D
	Calcul de coordonnées approchées	non	non	oui	oui
	Correction des observations				
	Réduction des distances sur l'ellipsoïde	paramétrable	paramétrable	paramétrable	non paramétrable
	Déviation de verticale	Prise en compte si connue	Prise en compte si connue, ou Calculable	Prise en compte si connue, ou Calculable	non paramétrable
	Réfraction géodésique	calculée	calculée	calculée	calculée
	Eléments statistiques de l'ajustement				
	Test global	Chi²	Chi²	Chi²	aucun
	Indicateurs de qualité	Ellipse, Intervalle d'erreur	Ellipsoïde d'erreur	Ellipsoïde, Ellipse, Intervalle d'erreur	Ellipsoïde d'erreur
	Indicateurs de fiabilité	Rectangle de fiabilité, Wi écart résiduel normé, redondance partielle …	Sphère de fiabilité, Wi erreur résiduelle normée, redondance partielle …	Wi erreur résiduelle normée, redondance partielle	Wi erreur résiduelle normée, redondance partielle
	Visualisation graphique (ellipses, fiabilité)	non	oui	oui	non

Tableau 4: Tableau récapitulatif des caractéristiques de chaque logiciel

1.3 Bilan de l'état de l'art

A travers cette première étude, nous avons pu établir un inventaire non exhaustif des logiciels de compensation de mesures topographiques. On a constaté qu'il en existait un grand nombre, et que, bien souvent, l'ajustement du réseau de points n'était pas leur unique destination. Pour les besoins de TPLM-3D, le respect des objectifs fixés pour ce projet et la suite de l'état de l'art, nous avons réduit notre liste de logiciels à la catégorie *Logiciels de Compensation*. Les logiciels de cette catégorie ont l'avantage d'être très paramétrables et d'offrir de nombreux moyens d'évaluation de la qualité d'un réseau. Ils répondent donc parfaitement aux besoins exprimés par TPLM-3D.

La deuxième partie de l'état de l'art a permis de dresser un inventaire des caractéristiques et principales fonctionnalités d'un logiciel de compensation. Une dizaine de fonctions communes à ces logiciels ont été regroupées au sein de deux catégories : le niveau Utilisateur et le niveau Calculs & Résultats. On a pu constater que les profils des logiciels étudiés étaient similaires, à quelques fonctions particulières près. On retiendra trois fonctionnalités intéressantes qui ne sont pas disponibles dans tous les logiciels : la compensation robuste (LTOP), le calcul de coordonnées approchées (Comp3D et GeoLab) et le module de visualisation (TRINET+ et GeoLab).

Cette classification nous a permis de mieux saisir les méthodes de calcul et les logiques de contrôle des observations et de validation des résultats intégrées dans ces programmes.

La partie 2 intitulée *Notions Théoriques,* permettra d'expliciter une partie des principes abordés lors de la confrontation des logiciels LTOP, TRINET+, GeoLab et Comp3D.

Partie 2 : Notions Théoriques

Dans le second paragraphe de la première partie de ce mémoire, intitulée *Etat de l'art,* nous avons fait référence à de nombreux concepts, intégrés dans les logiciels étudiés. Ces notions, bien souvent liées aux statistiques appliquées aux calculs topographiques ont fait l'objet d'études mathématiques nombreuses et complexes. L'objet de cette partie est de présenter brièvement ces notions, nécessaires à la bonne compréhension du logiciel de compensation LTOP et à la suite de ce mémoire, sans pour autant entrer en profondeur dans de difficiles considérations mathématiques.

Dans un premier temps, nous effectuerons un bref rappel du principe de la compensation par les intermédiaires. Puis nous exposerons le principe de la compensation robuste implémentée dans le logiciel LTOP à plusieurs niveaux. Enfin, nous développerons les différentes notions permettant de valider les résultats d'un ajustement par les moindres carrés.

Les explications sur les notions théoriques abordées dans cette partie sont empruntées aux cours de T. Landes [2010] et P.H. Cattin [2012].

2.1 Rappel sur la méthode de compensation par les intermédiaires

En topographie, lorsque l'on souhaite déterminer les coordonnées d'un point dans un système de référence, il est d'usage de répéter, un certain nombre de fois, les mesures d'angles et de distances nécessaires au calcul de ses coordonnées. On dispose ainsi de mesures surabondantes permettant d'assurer le contrôle et la fiabilité des résultats. L'exploitation optimale et l'ajustement global de ces mesures va permettre d'estimer la valeur des inconnues du calcul, c'est-à-dire les coordonnées du point.

Une méthode de calcul exploitant le principe des moindres carrés va permettre d'obtenir cette estimation par le biais d'équations liant les observations (mesures d'angles et de distances) aux inconnues (coordonnées). C'est ce qu'on appelle la compensation par les intermédiaires.

Les paragraphes qui suivent permettent de rappeler le principe de la compensation par les intermédiaires, tout en définissant les notations appelées à plusieurs reprises dans le mémoire.

2.1.1 Modèle fonctionnel

Un réseau classique de mesures topographiques est composé de mesures d'angles et de distances, dénommées par la suite « observations ». La compensation de ce réseau de mesures va permettre de déterminer les coordonnées des points nouveaux de ce réseau, qu'on appellera « inconnues ».

Le modèle fonctionnel permet d'exprimer mathématiquement les relations qui lient les observations aux inconnues par le biais d'équations d'erreurs de la forme :

$$L_i = l_i + v_i = F_i(X_1, X_2, \dots, X_q) \qquad \text{(E.1)}$$

Où : i : numéro de l'observation.
q : nombre d'inconnues.
n : nombre d'observations.

L_i : observation compensée.
l_i : observation brute.
v_i : erreur résiduelle.
$X_1, X_2, \dots, X_q$: inconnues compensées.

Chaque observation doit être exprimée sous forme d'équations d'erreurs. L'ensemble des équations d'erreurs forme un système d'équations surdéterminé (q < n).

$$\begin{aligned} v_1 &= F_1(x_1,\dots x_q) - l_1 \\ &\vdots \\ v_n &= F_n(x_1,\dots x_q) - l_1 \end{aligned} \qquad \text{(E.2)}$$

Dans la majorité des cas, les fonctions F_i permettant d'écrire les équations d'erreurs sont non linéaires. Il est donc nécessaire de les linéariser, en employant le développement en série de Taylor, limité au 1er ordre au voisinage des valeurs approchées des inconnues, afin de résoudre le système d'équations E.2.

Cette linéarisation permet d'obtenir les équations d'erreurs transformées de la forme :

$$v_i = a_i \cdot dx_1 + b_i \cdot dx_2 + \dots + k_i \qquad \text{(E.3)}$$

Où : *v_i : erreur résiduelle.*
$dx_1, \dots, dx_q$: appoints des inconnues à apporter aux valeurs approchées.
$a_i, b_i, c_i, \dots$: dérivées partielles de la fonction F_i par rapport aux inconnues.
$k_i = L_i' - l_i$: avec $L_i' = F_i(x_i', \dots, x_q')$ la valeur approchée de l'observation compensée calculée à partir des inconnues approchées.

La résolution du système E.2 peut donc être simplifiée par l'utilisation des équations d'erreurs transformées. On peut alors écrire le système E.2 sous forme matricielle :

$$v = A \cdot dx - K \qquad \text{(E.4)}$$

Où : *v : vecteur des erreurs résiduelles.*
A : matrice des dérivées partielles $a_i, b_i, c_i, \dots$
dx : vecteur des appoints.
K : vecteur des - k_i.

L'équation matricielle E.4 permet de définir le modèle fonctionnel.

2.1.2 Modèle stochastique

Le modèle stochastique permet de prendre en compte la précision de chaque observation entrant dans le modèle fonctionnel, en leur affectant un poids propre. La précision est exprimée par l'erreur moyenne quadratique (*emq*) de l'observation. Elle peut être exprimée a priori à partir de la précision des instruments et des méthodes mises en œuvre pour réaliser les mesures. On peut alors définir la matrice des poids p_i permettant d'affecter plus ou moins d'importance à chaque équation d'erreurs du modèle fonctionnel.

Suite à la compensation, on peut obtenir la précision a posteriori qui caractérise la précision réelle, ou effective, des observations.

En effectuant une analyse de la différence entre les modèles stochastiques a priori et a posteriori, on peut aussi mettre en évidence la présence de fautes probables dans les observations, ou un mauvais choix du modèle stochastique a priori.

2.1.3 Modèle mathématique

Le modèle mathématique est construit à partir des modèles fonctionnel et stochastique.

Partant des modèles fonctionnel et stochastique, l'unique solution estimée doit satisfaire à une condition posée par le principe des moindres carrés :

$$\sum_{i=1}^{n} p_i v_i^2 \rightarrow \min \qquad \text{(E.5)}$$

Où : p_i : poids de l'observation i.

Cette condition implique que les dérivées partielles de l'équation E.5 par rapport au inconnues soient simultanément nulles. Cette étape permet de former le *système des équations normales* (E.6). La solution est alors donnée par la résolution du système matriciel suivant :

$$N \cdot dx - nk = 0 \qquad \text{(E.6)}$$

Où : N : la matrice normale tel que $N = A^t \cdot P \cdot A$, avec P la matrice des poids des observations.

nk : la matrice des coefficients en k_i tel que $nk = A^t \cdot P \cdot K$.

Le système matriciel E.6 est aussi appelé *système des équations normales.* Chaque coefficient des équations normales correspond alors à un élément de la matrice N.

Les démonstrations mathématiques permettant d'aboutir à la solution ci-dessus sont développées par T. Landes [2010] et P.H. Cattin [2012].

2.2 La compensation robuste

La compensation robuste est une méthode issue de la statistique robuste, qui permet d'obtenir une solution probable en présence de fautes grossières dans les observations.

Le principe des moindres carrés, employé dans la compensation par les intermédiaires, fait l'hypothèse que les erreurs résiduelles des observations suivent une distribution normale. Or cette hypothèse n'est plus vérifiée dès lors que les observations sont entachées de fautes grossières. L'estimation des inconnues étant biaisée par la présence de ces fautes, la méthode des moindres carrés produit dans ce cas de mauvais résultats. L'estimation robuste vise donc à limiter leur influence, en s'appuyant sur leur faible probabilité d'occurrence.

Cette méthode est implémentée dans le logiciel LTOP, pour proposer à l'utilisateur un mode de calcul robuste en planimétrie ou en altimétrie. Cet outil particulier est idéal pour l'aide à la détection de fautes a posteriori dans les observations.

A. Carosio [1996] et P.H. Cattin [2012] décrivent le principe de la compensation robuste, ainsi que la façon dont cette méthode est introduite dans LTOP. En se basant sur leurs travaux, on exposera dans les prochains paragraphes les grands principes et mode de fonctionnement de l'estimation robuste.

2.2.1 Caractéristiques de la compensation robuste

De la même manière que pour la compensation par les intermédiaires, un modèle stochastique et un modèle fonctionnel définissent la compensation robuste. Une autre caractéristique permet de différencier les deux modèles de compensation : le point de rupture. Il quantifie la « robustesse » d'un modèle.

2.2.1.1 Modèle stochastique

L'hypothèse de la distribution normale des erreurs résiduelles d'observations est un critère d'existence du principe des moindres carrés. Pour un tel modèle on peut alors écrire :

$$F = \Phi \tag{E.7}$$

Où : F : distribution des erreurs résiduelles
Φ : distribution normale

On a vu en introduction que cette hypothèse n'est pas toujours valable, notamment lors de la présence de fautes dans les observations. Pour le modèle de compensation robuste, l'équation E.7 devient alors :

$$F = (1-\varepsilon)\cdot\Phi + \varepsilon\cdot G \tag{E.8}$$

Où : ε : probabilité d'apparition de fautes grossières
G : distribution inconnue des fautes grossières

2.2.1.2 Modèle fonctionnel

Le modèle fonctionnel qui permet de lier les observations aux inconnues est défini tel que :

$$L_i = F_i(x_1, x_2, ..., x_q) \tag{E.9}$$

La fonction F_i est choisie de manière à fournir une bonne estimation de la grandeur L_i même en présence de fautes. Elle est appelée *estimateur robuste.*

On distingue deux types d'estimateurs robustes :

- Les L-estimateurs : Ce sont des combinaisons linéaires d'une série d'observations qui permettent d'obtenir une estimation approchée de la valeur recherchée. On peut classer dans cette catégorie : la moyenne arithmétique, la moyenne pondérée ou la médiane.
- Les M-estimateurs : Ces estimateurs sont des fonctions permettant de rechercher la solution la plus probable d'un problème. Ils sont utilisés comme estimateurs des moindres carrés dans la compensation robuste, pour affecter des pondérations particulières aux observations aberrantes.

2.2.1.3 Le point de rupture

Le point de rupture permet de mesurer la robustesse d'un modèle. Il quantifie la proportion maximale de fautes que peut accepter un estimateur dans une distribution avant que les résultats fournis deviennent totalement faux.

Si l'on choisit l'exemple de la moyenne arithmétique, on peut dire que la robustesse de cet estimateur est nulle puisqu' une seule faute suffit à fausser entièrement l'estimation. Son point de rupture est donc de 0.

Si l'on choisit le cas de la médiane, P.H. Cattin [2012] démontre par l'exemple dans son cours que c'est un estimateur hautement robuste. Son point de rupture est de 0,5. Elle fournit donc une estimation encore acceptable même avec 50% de fautes dans les observations.

2.2.2 La compensation robuste sous LTOP

Sous LTOP, la compensation robuste est introduite à deux endroits :

- Au niveau du calcul des valeurs approchées des inconnues d'orientation, par l'utilisation de la médiane pondérée.
- Au niveau des compensations, planimétrique et altimétrique, par l'utilisation du M-estimateur de Huber.

2.2.2.1 L'estimateur de Huber

Ce M-estimateur, défini par le mathématicien P.J. Huber, est intéressant pour les calculs en topographie ou en géodésie à cause de sa similitude avec la méthode des moindres carrés.

A partir du modèle fonctionnel (E.9), un M-estimateur permet de définir une fonction des erreurs résiduelles *ρ(v)* telle que :

$$\sum p\rho(v) \rightarrow min \qquad \text{(E.10)}$$

En fonction du choix de cette fonction, l'estimateur sera plus ou moins robuste. En posant $\rho(v) = v^2$, on retrouve la condition du modèle des moindres carrés.

P.J. Huber propose pour son estimateur la fonction continue et convexe suivante :

$$\rho(v_i) = \begin{cases} 0{,}5 \cdot v_i^2 \; pour \; |v_i| < k \\ k \cdot |v_i| - 0{,}5 \cdot k^2 \; pour \; |v_i| \geq k \end{cases} \qquad \text{(E.11)}$$

Où : k : paramètre robuste proportionnel à l'erreur moyenne de l'observation

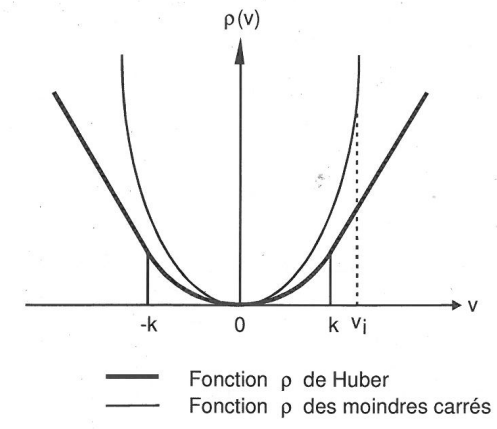


Figure 1: Fonction de Huber et Fonction des moindres carrés (P.H. Cattin, [2012])

La Figure 1 ci-dessus présente une représentation graphique des fonctions *ρ(v)* pour l'estimateur de Huber et l'estimation par les moindres carrés.

On remarque que dans l'intervalle [-k ; k], la fonction $\rho(v)$ de l'estimateur de Huber est égale à celle des moindres carrés à un facteur de 0,5 près. Les *vi* hors de cet intervalle ont une contribution linéaire au critère E.10, donc plus faible que dans le cas des moindres carrés. De cette manière, l'importance des observations ayant de grands résidus est minimisée.

Le choix du paramètre k permet d'affiner la robustesse de la compensation. Plus k est grand, moins l'estimation est robuste. Lorsque k tend vers ∞, l'estimateur de Huber correspond à la méthode des moindres carrés à un facteur de 0,5 près.

Sous LTOP, une valeur limite k_i est calculée pour chaque observation. Elle fait intervenir la précision de l'observation ainsi qu'un facteur de proportionnalité tel que :

$$k_i = C_{ROB} \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{q_{v_i v_i}} \qquad \text{(E.12)}$$

Où : C_{ROB} *: facteur de proportionnalité*
σ_0 *: emq de l'unité de poids*
q_{vivi} *: cofacteur de l'erreur résiduelle* v_i

Dans le cadre de réseaux géodésiques, il arrive que la surdétermination soit faible. Ainsi, des fautes, même de petite taille, peuvent biaiser l'estimation. A. Carosio, [1996] explique que cette définition, propre à chaque v_i du coefficient k_i, permet de limiter l'influence d'une faute, même si sa surdétermination est faible.

2.2.2.2 La fonction d'influence

On a vu dans le paragraphe 2.1.3 que le critère des moindres carrés imposait que les dérivées de la fonction $\sum pvv \rightarrow min$ par rapport aux inconnues soient simultanément nulles.

Dans le cas de la compensation robuste selon Huber, la condition s'écrit $\sum p\rho(v) \rightarrow min$. De façon analogue, on obtient alors des dérivées du type :

$$\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \frac{\partial \rho(v_i)}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \frac{\partial \rho(v_i)}{\partial v_i} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \Psi(v_i) \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0 \qquad \text{(E.13)}$$

Où : $\psi(v_i)$ *: la fonction d'influence.*

La fonction $\psi(v_i)$, appelée fonction d'influence, est définie telle que :

$$\Psi(v_i) = \frac{\partial \rho(v_i)}{\partial v_i} = \begin{cases} v_i & pour \quad |v_i| < k \\ signe(v_i) \cdot k & pour \quad |v_i| \geq k \end{cases} \qquad \text{(E.14)}$$

La Figure 2 montre la représentation graphique de la fonction $\psi(v_i)$ pour l'estimateur de Huber. On remarque que cette fonction permet de bloquer l'influence des observations pour lesquelles $|v_i| \geq k$. Dès qu'un résidu atteint le seuil ±k, son influence reste constante, quelle que soit la grandeur de la faute. On peut donc limiter l'influence de l'observation concernée dans la compensation.

Ainsi, dans une compensation robuste, les éléments de la matrice normale (cf. E.6) dépendent de la grandeur des résidus des observations. En effet, leur contribution à la matrice normale diffère selon qu'ils se trouvent à l'intérieur ou à l'extérieur de l'intervalle [-k ; k].

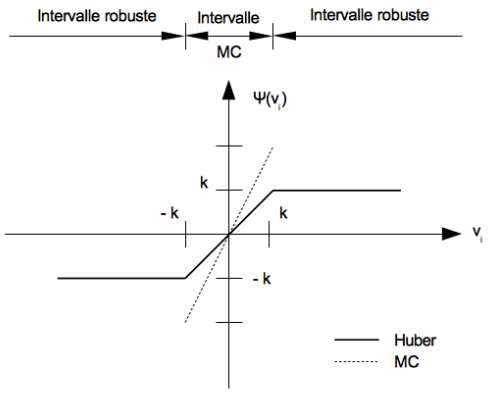


Figure 2: Fonction d'influence pour l'estimateur de Huber (P.H. Cattin, [2012])

2.2.2.3 Méthode de calcul

La méthode de calcul d'une compensation robuste est assez similaire au principe des moindres carrés. C'est un processus itératif. À la première itération, on réalise une compensation par la méthode des moindres carrés classique.

Ensuite, à chaque nouvelle itération, on réalise les quatre étapes suivantes :

- affectation des erreurs à l'intérieur ou à l'extérieur de l'intervalle [-k ; k],
- calcul des nouveaux coefficients de la matrice normale,
- résolution du système,
- répétition jusqu'à ce que toutes les erreurs résiduelles soient affectées au bon intervalle.

A la i-ème itération, on obtient donc une estimation de la solution, proche de la solution réelle sans faute, et on peut identifier les fautes dans les observations. Il suffit alors de relancer une compensation classique par les moindres carrés, en écartant dès le début les observations identifiées comme des fautes et l'on obtient la solution finale à la compensation.

2.3 Les éléments de validation d'un ajustement

On peut quantifier la qualité de détermination d'un réseau de points selon deux critères :

- la précision : elle est fonction de la configuration d'un réseau et des points de rattachement, des instruments et méthodes de travail mis en œuvre… etc.
- la fiabilité : c'est une notion qui permet de quantifier, dans un réseau, la faculté de pouvoir déceler, avec une grande probabilité, les fautes grossières.

Dans les paragraphes suivants, on présentera les indicateurs de précision et de fiabilité calculables suite à une compensation par les moindres carrés.

2.3.1 Rappels

A partir des modèles stochastique et fonctionnel d'une compensation par les moindres carrés, plusieurs matrices de cofacteurs peuvent êtres définies. Elles seront très utiles pour calculer les indicateurs de précision et de fiabilité. Le tableau 5 ci-dessous regroupe les plus courantes.

Matrice des cofacteurs :	Formule
Observations	$Q_{ll} = P^{-1}$
Inconnues	$Q_{xx} = N^{-1}$
Observations compensées	$Q_{LL} = A \cdot Q_{xx} \cdot A^T$
Erreurs résiduelles	$Q_{vv} = Q_{ll} - Q_{LL}$

Tableau 5: Récapitulatif des matrices des cofacteurs

Il est ensuite très aisé de calculer les matrices de variances-covariances des grandeurs correspondantes, en les multipliant par la variance a posteriori de l'unité de poids.

2.3.2 Les indicateurs de précision

Plusieurs indicateurs, facilement calculables à partir de la matrice des cofacteurs des inconnues, fournissent des indications quant à la qualité d'insertion d'un point nouveau dans un réseau. T. Landes [2010] définit dans son cours les erreurs moyennes quadratiques des coordonnées X et Y d'un point.

Elles permettent d'analyser la précision d'un point suivant les directions principales d'un système de coordonnées.

Or, P.H. Cattin [2012] rappelle que la précision d'insertion d'un point nouveau dépend principalement de sa position relative par rapport aux points d'appui. Pour analyser plus finement la précision d'un point, il serait intéressant de disposer d'un indicateur donnant une information dans une direction quelconque du plan. On définit pour cela un domaine du plan autour d'un point nouveau : l'ellipse d'erreur moyenne.

2.3.2.1 Ellipse d'erreur moyenne d'un point

L'ellipse d'erreur moyenne d'un point est une région de confiance du plan permettant de définir une surface de probabilité à l'intérieur de laquelle un point vrai P a *x* chance de se trouver. Le niveau de confiance est généralement fixé à un sigma (σ), soit une probabilité de 39%.

Sans démonstration, on empruntera à P.H. Cattin, [2012] les définitions des paramètres d'une ellipse d'erreur.

$$\theta = \arctan\left(\frac{q_{XX} - q_{YY} + \sqrt{\left(q_{XX} - q_{YY}\right)^2 + 4 \cdot q_{XY}^2}}{2 \cdot q_{XY}}\right)$$

$$a = s_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(q_{XX} + q_{YY} + \sqrt{\left(q_{XX} - q_{YY}\right)^2 + 4 \cdot q_{XY}^2}\right)} \qquad \text{(E.15)}$$

$$b = s_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(q_{XX} + q_{YY} - \sqrt{\left(q_{XX} - q_{YY}\right)^2 + 4 \cdot q_{XY}^2}\right)}$$

Où : θ : le gisement du grand axe de l'ellipse
a : le demi-grand axe de l'ellipse
b : le demi-petit axe de l'ellipse
s_0: emq a posteriori de l'unité de poids
q_{XX}, q_{YY}, q_{XY}: cofacteurs des inconnues X et Y

On a vu que les ellipses d'erreur étaient liées et dépendantes de la configuration du réseau de points d'appui. L'analyse de leur taille et de leur orientation peut alors éventuellement permettre de déceler des faiblesses aux niveaux de certains points d'appui. Lors de chantiers d'auscultation d'ouvrage d'art, il peut être intéressant d'effectuer une analyse diachronique des ellipses d'erreur des points auscultés. Si on constate des variations de taille et de forme des ellipses, on peut alors mettre en évidence une certaine instabilité de l'ouvrage.

Par ailleurs, lorsque l'on prépare la réalisation d'un réseau en effectuant des calculs de pré-analyse, il est possible de calculer des ellipses d'erreur a priori. On utilise alors l'erreur moyenne a priori de l'unité de poids dans les formules précédentes. L'orientation des ellipses obtenues est identique à celle calculée a posteriori. Seul un facteur d'échelle (différence entre l'erreur moyenne a priori et a posteriori de l'unité de poids) modifie leur taille.

2.3.2.2 Erreur moyenne linéaire d'un point

L'erreur moyenne linéaire (E.15) est un indicateur qui a l'avantage d'être indépendant du système de coordonnées (P-H Cattin [2012]). Elle caractérise donc plus simplement la précision d'un point et permet d'effectuer des comparaisons plus directes pour la précision d'échantillons de points.

$$emq_{plani} = \sqrt{\left(emq_X^2 + emq_Y^2\right)} = s_0 \cdot \sqrt{\left(q_{XX} + q_{YY}\right)} \qquad \text{(E.16)}$$

La démonstration suivante permet d'établir que la composition quadratique des ½ petit et grand axes d'une ellipse d'erreur permet de retrouver l'erreur moyenne linéaire définie à l'équation E.16 :

On a,

$$a^2 + b^2 = s_0^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(q_{YY} + q_{XX} + \sqrt{\left(q_{YY} - q_{XX}\right)^2 + 4 \cdot q_{YX}^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot \left(q_{YY} + q_{XX} - \sqrt{\left(q_{YY} - q_{XX}\right)^2 + 4 \cdot q_{XY}^2}\right)\right)$$

Soit,

$$a^2 + b^2 = s_0^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot \left(q_{YY} + q_{XX}\right)\right)\right) = s_0^2 \cdot q_{YY} + s_0^2 \cdot q_{XX}$$

On obtient donc :

$$a^2 + b^2 = emq_x^2 + emq_y^2 = emq_{plani}^2$$

Remarque : La composition quadratique de cette erreur moyenne planimétrique avec l'erreur moyenne altimétrique permettra de définir une erreur moyenne sur la position XYZ d'un point. Dans la suite de ce rapport, on utilisera à plusieurs reprises l'erreur moyenne sur la position XYZ d'un point pour faciliter la comparaison d'échantillons de points.

2.3.2.3 Ellipsoïde d'erreur moyenne

De façon analogue à l'ellipse d'erreur moyenne, il est possible de définir un ellipsoïde d'erreur pour un point, à l'issue d'un calcul tridimensionnel. Les logiciels TRINET+, et Comp3D présentés précédemment utilisent cet indicateur pour qualifier la précision d'intégration d'un point dans un réseau.

Ainsi, l'ellipsoïde d'erreur moyenne définit une zone de l'espace dans laquelle un point vrai P a une probabilité de se situer de ~20%. Dans le manuel d'utilisateur de TRINET+, S. Guillaume et al. [2008] rappellent la définition des paramètres d'un ellipsoïde d'erreur à partir de la matrice des cofacteurs des inconnues.

En composant quadratiquement les trois axes d'un ellipsoïde d'erreur, on retrouve l'erreur moyenne linéaire sur la position XYZ d'un point.

2.3.3 Les indicateurs de fiabilité

Un réseau de mesures compensées par la méthode des moindres carrés n'est pas toujours fiable. Des fautes, mêmes importantes, ne sont pas toujours détectées à cause du critère des moindres carrés, qui tend à minimiser les résidus sur les observations et donc à répartir de façon homogène une faute. Ainsi, pour apporter une aide à la détection de fautes dans les observations, certains logiciels de compensation intègrent, aux résultats d'un ajustement, de nombreux indicateurs de fiabilité.

Les termes fiabilité et fiable, en géodésie ou topographie, utilisés d'un point de vue qualitatif, ont le même sens que dans le langage courant, c'est-à-dire digne de confiance, et/ou contrôlé. Le terme fiabilité est un critère dit « subjectif », car il est soumis à l'interprétation et au jugement de chacun. La théorie développée par W. Baarda [1968] a pu transformer ce terme en un critère objectif, très utilisé pour le contrôle de réseau géodésique.

Les logiciels LTOP et TRINET+ intègrent cette théorie à travers deux groupes d'indicateurs de fiabilité : la fiabilité interne (celle des observations) et la fiabilité externe (celle des résultats d'une compensation).

2.3.3.1 La fiabilité des observations

La fiabilité des observations peut être quantifiée grâce au calcul de quatre indicateurs dits de *fiabilité interne* : la fiabilité locale, l'erreur résiduelle normée, la grandeur probable d'une faute détectée, et l'indicateur de fiabilité interne. Ils permettent de contrôler individuellement la fiabilité de chaque observation.

2.3.3.1.1 Indicateurs de fiabilité locale

Pour chaque mesure, on peut calculer un indicateur de fiabilité locale z_i qui est un nombre sans dimension compris entre zéro et 1. La somme des z_i de toutes les observations est égale à la surdétermination du réseau. La fiabilité locale est définie telle que :

$$z_i = \frac{q_{v_i v_i}}{q_{l_i l_i}} \qquad \text{(E.17)}$$

Où : q_{vivi} *est le cofacteur du résidu i*
q_{lili} *est le cofacteur de l'observation i*

L'indicateur z_i est aussi appelé redondance partielle, car chaque z_i montre quelle est la participation de la i-ème observation à la surdétermination du réseau.

Ainsi, pour:

- $z_i = 0\%$: l'information n'est pas du tout contrôlée, une faute sur l'observation i ne pourra jamais être détectée, quel que soit son ordre de grandeur ;
- $z_i = 100\%$: la mesure est totalement contrôlée et superflue du point de vue de la fiabilité du réseau ;
- $z_i = 50\%$: la mesure est bien contrôlée (cas d'une mesure double).

La valeur de z_i dépend de deux paramètres : la géométrie du réseau et la précision des mesures. Une mesure très précise (ayant donc un grand poids dans la compensation) sera moins bien contrôlée et obtiendra un petit z_i (et inversement pour des mesures peu précises).

Par exemple, si l'on mesure une distance avec un fil invar puis avec un double mètre, il est aisé de comprendre que l'on peut parfaitement vérifier la mesure « double mètre » avec la mesure « invar » (z_i grand). En revanche, l'inverse n'est pas possible, la mesure « invar » (z_i faible) ne peut être contrôlée au double mètre.

Ainsi, d'après cet exemple, on comprend bien qu'il est indispensable d'attribuer des erreurs moyennes quadratiques a priori réalistes aux observations. On a vu que les valeurs de z_i dépendent uniquement de la précision et de la géométrie d'un réseau. Elles sont donc calculables a priori, et sont des éléments indispensables à l'optimisation d'un réseau lors d'un calcul de pré-analyse.

2.3.3.1.2 L'erreur résiduelle normée

Pour valider individuellement chaque observation, il est possible d'analyser les résidus v_i. Cependant, cette analyse est délicate et peu concluante car les résidus des observations dépendent des poids. La comparaison des v_i ne peut donc être objective.

On sait que la distribution des résidus suit une courbe gaussienne. En normalisant cette distribution, on obtient les erreurs résiduelles normées qui suivent une loi normale centrée et réduite $N(0,1)$. On définit alors l'erreur résiduelle normée w_i:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{v_i}{s_0 \cdot \sqrt{\left(q_{v_i v_i}\right)}} \qquad \text{(E.18)}$$

Les erreurs résiduelles normées peuvent alors être comparées les unes aux autres et plus particulièrement à une valeur maximale w_{max} permettant de fixer la limite d'acceptation ou de rejet de l'observation concernée.

Le logiciel LTOP fixe par défaut un w_{max} de 2,5. On peut alors interpréter les w_i avec le tableau 6 suivant afin de déceler des fautes probables dans les observations.

Intervalle	Interprétation
$w_i < 2,5$	Observation l_i sans faute
$2,5 < w_i < 4,1$	Faute possible sur l'observation l_i
$4,1 < w_i$	Faute très probable sur l'observation l_i

Tableau 6: Interprétation des erreurs résiduelles normées

2.3.3.1.3 Grandeur d'une faute probable non détectée

Lorsqu'un w_i dépasse la tolérance w_{max}, la mesure i est alors entachée d'une faute dont l'ordre de grandeur est inconnu. Il est alors possible de calculer la grandeur probable de la faute qui devrait être commise pour provoquer ce w_i. L'indicateur g_i est alors défini tel que :

$$g_i = -\frac{v_i}{z_i} \qquad \text{(E.19)}$$

Cet indicateur g_i est déterminé de manière statistique, on doit donc lui accorder une certaine marge de précision. Plus l'observation l_i est bien contrôlée, plus g_i indiquera la faute avec une grande précision.

2.3.3.1.4 Fiabilité interne ∇l_i

La valeur ∇l_i représente la plus petite faute détectable pour une observation donnée. Elle est calculée en fixant les valeurs de l'erreur de deuxième espèce β et de w_{max}.

L'erreur de deuxième espèce β représente la probabilité d'accepter, dans une compensation, une observation entachée d'une faute, qui ne suit donc plus une distribution normale des w_i.

En d'autres termes, elle représente la probabilité de ne pas détecter une faute grossière dans une série d'observations.

La figure 3 représente graphiquement la surface de probabilité de l'erreur de deuxième espèce. La valeur δ représente le déplacement du centre de la distribution normale provoquée par une faute grossière. On voit alors que, plus une faute grossière est importante, plus sa probabilité d'être ignorée devient faible.

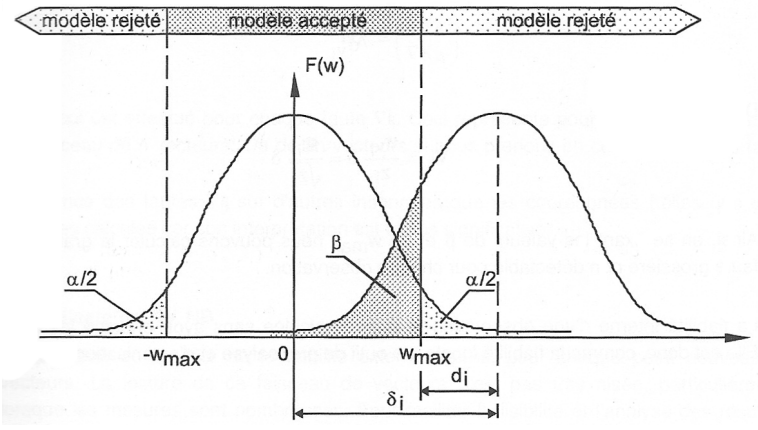


Figure 3: Distribution des w_i sans faute et avec faute (P.H. Cattin, [2012])

Remarque : La surface de probabilité α/2 représente la probabilité de rejeter une observation alors que celle-ci est juste. La surface 1 - α (modèle accepté), représente le niveau de confiance du test statistique. En fixant 1 - α = 68,3%, on retrouve l'écart-type d'une série statistique.

Dans le logiciel LTOP, on se fixe par défaut une valeur de l'erreur de deuxième espèce à 5%. Et on cherche alors à calculer la faute ∇li maximale autorisée pour qu'il y ait une probabilité de 5% qu'elle ne soit pas détectée. Pour chaque observation, on calcule alors une valeur ∇ li qui vérifie :

$$\nabla l_i = \frac{\sigma_{l_i}}{\sqrt{(Z_i)}} \cdot \delta \qquad \text{(E.20)}$$

Où : σ_{li} : la précision de l'observation i
z_i : la redondance partielle de l'observation i
δ : égale à 4.1, le déplacement du centre de distribution pour β et w_{max} fixés

2.3.3.2 La fiabilité externe

Les indicateurs de fiabilité externe permettent de quantifier la fiabilité des résultats d'une compensation : les coordonnées des points d'un réseau.

Ces indicateurs expriment donc l'influence des fautes non détectées ∇l_i sur les positions des points, pour les cas les plus défavorables. Ils sont calculés de la même manière que les appoints d'une compensation, en faisant l'hypothèse qu'une seule faute n'intervienne à la fois.

On peut alors calculer, pour chaque coordonnée, l'influence d'une faute non détectée :

$$\nabla x = N^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \nabla l_i \qquad \text{(E.21)}$$

Où : ∇x est le vecteur des influences provoquées sur les coordonnées du réseau par la grandeur de la faute non détectée sur l'observation l_i

Le déplacement d'un point, provoqué par une faute non détectée, s'exprime alors sous forme d'un vecteur du type :

$$\vec{N}_P = \begin{pmatrix} \nabla X_P \\ \nabla Y_P \end{pmatrix} \qquad \text{(E.22)}$$

Où : $\vec{N}_P$: le vecteur de fiabilité externe du point P
∇X_P, ∇Y_P : les composantes de la fiabilité issues du vecteur ∇x (E.21)

Si l'on dispose de *n* observations dans un réseau, on peut alors calculer un faisceau de *n* vecteurs de fiabilité pour chaque point du réseau. Pour faciliter la lecture et l'interprétation de la fiabilité externe d'un point, le logiciel LTOP a choisi de fournir à l'utilisateur trois paramètres permettant de définir la taille et l'orientation d'un rectangle de fiabilité, dont l'enveloppe contient tous les vecteurs de fiabilité. L'orientation et la taille du demi-grand côté du rectangle étant données par le plus grand vecteur de fiabilité (cf. Figure 4).

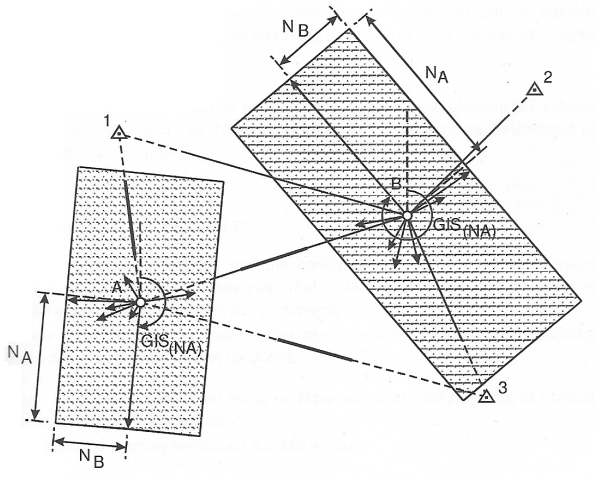


Figure 4: Rectangles de fiabilité des points A et B (P.H. Cattin [2012])

La fiabilité externe peut donc être interprétée comme une zone du plan, dans laquelle un point pourrait se déplacer au cas où une faute grossière subsisterait dans les observations.

La fiabilité des observations dépendant de leur précision et de la configuration du réseau, on peut calculer a priori les paramètres des rectangles de fiabilité. On a vu ici la définition de la fiabilité externe pour un modèle de compensation 2D+1 (utilisé sous LTOP). Pour les modèles de compensation 3D (logiciel TRINET+), on peut calculer de façon analogue, pour chaque coordonnée (X, Y et Z) d'un point l'influence, ∇li d'une faute non détectée. A partir du faisceau de vecteurs calculés, on choisit généralement de ne retenir que le plus grand vecteur de fiabilité, qui peut être interprété dans l'espace comme une sphère de fiabilité.

2.4 Conclusion

A travers l'exposition de tous ces concepts théoriques, on a pu saisir l'importance des indicateurs de fiabilité et de précision, et celle de la compensation robuste dans un logiciel de compensation tel que LTOP. Tous ces outils statistiques offrent à l'utilisateur de nombreuses pistes, tant pour l'analyse de la précision et la fiabilité d'un réseau de mesures, que pour et l'aide à la détection de fautes dans des séries d'observations.

Les prochaines parties et annexes de ce mémoire reviendront sur ces concepts, pour l'analyse des calculs effectués sous LTOP, TRINET+ ou Comp3D.

Partie 3 : Calculs comparatifs sur les logiciels LTOP, TRINET+ et Comp3D

Dans cette partie, nous étudierons les logiciels LTOP, TRINET+ et Comp3D en nous basant sur la compensation d'un réseau de points. L'objectif est de comparer ces logiciels aux niveaux des calculs, mais aussi des fonctions de validation de résultats et de détection des erreurs. On tentera aussi de tester les fonctions particulières propres à chaque logiciel.

Dans un premier temps, nous présenterons les réseaux de points impliqués dans les calculs. Ensuite, seront exposés et analysés les résultats de la compensation. Puis, nous testerons les capacités de chaque logiciel à détecter des fautes, en introduisant volontairement des mesures biaisées dans les fichiers d'observations. La conclusion de cette étude comparative permettra de valider le choix du logiciel LTOP par TPLM-3D.

N.B.: Le logiciel GeoLab a été exclu de cette étude car la version d'évaluation disponible était trop contraignante, n'autorisant que des calculs de fichiers-exemples fournis par la société Bitwise Ideas.

3.1 Présentation des réseaux

Pour les besoins de ce projet de fin d'études, nous avons mis en place deux réseaux de points sur le parking de TPLM-3D. Un premier réseau, dénommé « réseau primaire », a été défini de manière très précise, afin de pouvoir servir de réseau de rattachement pour de futurs travaux. Un second, dénommé « réseau secondaire », a été inséré dans le réseau primaire. Les observations de ce réseau fourniront la base des calculs comparatifs effectués dans le deuxième paragraphe de cette partie.

3.1.1 Le réseau primaire

Ce réseau de base servira au rattachement des futurs travaux de ce projet. Il pourra également être conservé par TPLM-3D pour des travaux de contrôle d'appareils et autres tests pour des chantiers particuliers.

La présentation de ce réseau, des méthodes de lever et des résultats des calculs, n'étant pas pertinentes pour le contenu de la présente étude, elle a été annexée à ce mémoire (Annexe A).

3.1.2 Le réseau secondaire

On pourra aussi consulter, en annexe A (p. 6), un plan du réseau secondaire implanté sur le parking de TPLM-3D. Huit points, nommés de 1 à 8, ont été répartis sur l'ensemble du parking, de manière à créer un canevas s'insérant dans le réseau primaire. Les observations effectuées sur ce réseau formeront la base des calculs comparatifs effectués dans un second paragraphe.

Ce réseau secondaire est rattaché au réseau primaire. Nous ne nous sommes fixés aucune contrainte de précision. L'appareil utilisé est une station totale de TPLM-3D, le TCRA 1101 de Leica, régulièrement utilisée sur tous types de chantiers.

Le calcul de compensation a été effectué sous LTOP. On a considéré comme fixes les points du réseau primaire (de R.1 à R.6).

	Coordonnées compensées LTOP		
Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	988,9234	1085,0318	100,1143
2	997,1739	1055,5865	100,0420
3	1000,3683	1056,2628	100,1050
4	1001,0406	1052,2653	100,1086
5	997,6273	1037,9560	100,0805
6	1006,3191	1024,5920	100,2302
7	1002,5379	1009,2134	99,9664
8	1008,6290	1004,1018	100,0516

Tableau 7: Coordonnées compensées sous LTOP des points du réseau secondaire

POINT	EMA	EMB	GISA	EMH	Emq Plani.	Emq XYZ
	(mm)	(mm)	(gon)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0,6	0,6	-91,8	0,8	0,8	1,2
2	0,8	0,6	-17,0	1,1	1,0	1,5
3	0,9	0,6	-14,5	1,1	1,1	1,5
4	0,9	0,6	-14,1	1,1	1,1	1,5
5	0,8	0,6	-12,6	1,0	1,0	1,4
6	0,8	0,7	6,5	1,0	1,1	1,5
7	0,9	0,9	-71,7	1,2	1,3	1,7
8	0,8	0,6	62,9	0,9	1,0	1,3

Tableau 8: Paramètres des ellipses d'erreur et écart-type sur la position XYZ de chaque point du réseau primaire

Le Tableau 7 présente un listing des coordonnées des points du réseau secondaire.

Le Tableau 8 présente un récapitulatif, pour chaque point, des paramètres d'ellipses d'erreurs moyennes. On constate que la précision XYZ moyenne des points du réseau secondaire est de *± 1,5 mm*. Les ellipses d'erreurs permettent de quantifier la qualité d'insertion des points nouveaux dans un réseau. On remarque que la qualité des points du réseau secondaire est assez homogène, puisque aucun écart-type ne s'écarte significativement de la précision moyenne.

3.2 Calculs comparatifs sur le réseau secondaire

Dans ce paragraphe, on effectuera dans un premier temps une comparaison des résultats du calcul de compensation du réseau secondaire sous TRINET+ et Comp3D avec les résultats sous LTOP. Ensuite, on effectuera les mêmes calculs en introduisant différents types de fautes (minime, grossière et combinée). Enfin on analysera les résultats fournis par les trois logiciels. L'objectif reste de tester, dans chaque logiciel, les différents moyens de détection de fautes mis à disposition de l'utilisateur.

3.2.1 Remarques préalables

Les compensations ont été effectuées sous les trois logiciels avec les mêmes modèles stochastiques et les mêmes paramétrages (pas de réduction des distances au niveau 0 puisqu'il s'agit d'un réseau local).

Sous LTOP et TRINET +, il est possible de définir précisément les modèles stochastiques : erreurs de centrage des stations et des cibles, erreurs sur les mesures d'angles horizontaux et verticaux, erreurs sur les mesures de distances, de hauteurs de stations et de prismes…

On se souvient cependant que, sous Comp3D, on peut définir seulement les erreurs des mesures de distances et d'angles. Ces erreurs ont donc été définies identiques à celles paramétrées sous LTOP et TRINET+.

Le modèle stochastique de Comp3D étant moins paramétrable, on peut déjà s'attendre à quelques différences dans les résultats de la compensation.

Par ailleurs, sous LTOP et TRINET+, la compensation ayant été réalisée avec un calcul contraint, les points de rattachement (points du réseau primaire) ont donc une *emq* théorique nulle. Comp3D ne disposant pas de cette option de calcul contraint, pour réaliser les calculs dans les mêmes conditions que les autres logiciels, C. Guérin [2010] préconise dans son mémoire la méthode suivante : fixer les écarts types a priori en planimétrie et en altimétrie sur les points de rattachements à *1 dmm* afin de se rapprocher des conditions de calcul sous LTOP et TRINET+.

3.2.2 Compensation sans faute

3.2.2.1 Analyse des jeux de coordonnées

Les Tableau 9 et Tableau 10 présentent les écarts en mètre et en position XYZ, pour chaque point par rapport au jeu de coordonnées de référence (LTOP).

La différence moyenne, en position XYZ, entre les jeux de coordonnées de LTOP et de TRINET+ et Comp3D est de *0,2 mm* (cf. Tableau 9). Elle est quasi nulle. Ainsi, bien que les méthodes de calcul des trois logiciels soient différentes (LTOP utilise une méthode de calcul 2D+1 et TRINET+ et Comp3D utilisent une méthode de calcul 3D), l'impact sur le calcul des coordonnées des points du réseau n'est pas significatif.

La différence moyenne entre les jeux de coordonnées de TRINET+ et Comp3D est de *0,1 mm* (cf. Tableau 10). Elle est quasi nulle, ce qui est normal puisque les méthodes de calcul sont identiques sur les deux logiciels. Les légères différences sur les jeux de coordonnées sont probablement dues au fait que la définition du modèle stochastique est plus légère sous Comp3D.

Finalement, bien que les méthodes de calcul implémentées sous ces trois logiciels soient différentes (2D+1 ou 3D), les différences sur les jeux de coordonnées calculées ne sont pas significatives. Pour observer une plus grosse différence sur les cordonnées compensées, il aurait été plus pertinent de choisir un réseau de points lui-même en 3D, c'est-à-dire avec des dénivelées plus importantes entre les points. Dans le réseau considéré, l'écart altimétrique maximal entre deux points est d'environ *0,30 m*.

	Coordonnées compensées LTOP			Différence (mm)	
Point	X (m)	Y (m)	Z (m)	TRINET+	Comp3D
1	988,9234	1085,0318	100,1143	0,1	0,2
2	997,1739	1055,5865	100,0420	0,1	0,2
3	1000,3683	1056,2628	100,1050	0,2	0,2
4	1001,0406	1052,2653	100,1086	0,2	0,2
5	997,6273	1037,9560	100,0805	0,1	0,1
6	1006,3191	1024,5920	100,2302	0,1	0,3
7	1002,5379	1009,2134	99,9664	0,2	0,2
8	1008,6290	1004,1018	100,0516	0,2	0,2

Tableau 9: Ecart en position XYZ pour chaque point entre les coordonnées issues du calcul LTOP et celles issues des calculs TRINET+ et Comp3D

	Coordonnées compensées Comp3D			Différence (mm)
Point	X (m)	Y (m)	Z (m)	TRINET+
1	988,9236	1085,0318	100,1143	0,2
2	997,1741	1055,5864	100,0421	0,1
3	1000,3682	1056,2626	100,1051	0,1
4	1001,0405	1052,2652	100,1088	0,1
5	997,6272	1037,9560	100,0805	0,1
6	1006,3191	1024,5919	100,2305	0,2
7	1002,5378	1009,2133	99,9665	0,1
8	1008,6288	1004,1017	100,0517	0,1

Tableau 10: Ecart en position XYZ pour chaque point entre les coordonnées issues des calculs TRINET+ et Comp3D

3.2.2.2 Analyse des indicateurs de précision

On a déjà présenté les paramètres des ellipses d'erreurs moyennes pour le calcul LTOP dans le paragraphe 3.1.2 (cf. Tableau 8). Pour les logiciels TRINET+ et LTOP, on dispose des paramètres des ellipsoïdes d'erreurs. Les Tableau 11 et Tableau 12 récapitulent, pour chaque point, les paramètres des ellipsoïdes d'erreurs.

Ellipsoïde d'erreur COMP3D							
POINT	A	B	C	Az(A)	Az(B)	Az(C)	EmqXYZ
	[mm]	[mm]	[mm]	[gon]	[gon]	[gon]	[mm]
1	0,99	0,66	0,64	86,6	386,6	185,5	1,3
2	0,93	0,87	0,80	98,4	398,4	247,7	1,5
3	0,92	0,88	0,80	95,0	395,0	231,6	1,5
4	0,91	0,89	0,80	357,9	57,9	278,8	1,5
5	0,86	0,80	0,76	79,7	379,7	212,2	1,4
6	0,94	0,81	0,76	67,7	367,7	200,6	1,5
7	1,12	0,94	0,81	107,4	7,3	254,9	1,7
8	0,96	0,63	0,58	66,2	366,2	183,2	1,3

Tableau 11: Paramètres des ellipsoïdes d'erreurs calculés avec Comp3D

Ellipsoïde d'erreur TRINET+								
POINT	A	B	C	Gis(A)	Z(A)	Gis(B)	Z(B)	Emq XYZ
	[mm]	[mm]	[mm]	[gon]	[gon]	[gon]	[gon]	[mm]
1	0,81	0,71	0,60	169,78	0,04	87,11	100,01	1,2
2	1,13	0,81	0,67	305,27	0,07	382,18	100,03	1,5
3	1,13	0,82	0,67	334,49	0,07	384,29	100,05	1,5
4	1,13	0,83	0,66	356,39	0,11	385,71	100,10	1,5
5	1,03	0,75	0,64	247,66	0,07	386,86	99,96	1,4
6	1,03	0,78	0,72	247,91	0,17	31,42	99,84	1,5
7	1,25	0,99	0,88	271,66	0,29	108,88	99,76	1,8
8	0,91	0,84	0,60	262,09	1,41	68,10	98,59	1,4

Tableau 12: Paramètres des ellipsoïdes d'erreurs calculés avec TRINET+

Les paramètres A, B et C quantifient la longueur, en millimètre, des axes principaux de l'ellipsoïde. Les azimuts, dans le cas de Comp3D, les gisements et angles zénithaux, dans le cas de TRINET+, permettent d'orienter, dans l'espace, l'ellipsoïde d'erreur concerné et donc de déterminer les axes de plus grande variance d'un point.

On a vu que les ellipses d'erreur permettaient de définir les axes de plus grande et de plus petite variances d'un point selon une orientation totalement indépendante de celle du système de coordonnées (axes X et Y).

Elles permettent donc d'analyser la précision d'intégration d'un point dans un réseau, par rapport aux points fixes, bien mieux que les erreurs moyennes quadratiques des coordonnées, qui sont dépendantes des directions des axes X et Y.

De façon analogue aux ellipses d'erreur, les ellipsoïdes d'erreur quantifient la précision d'insertion d'un point nouveau dans un réseau, mais directement en trois dimensions. Grâce à cet indicateur, on évalue la précision d'insertion d'un point dans un réseau tridimensionnel de manière plus homogène qu'en combinant l'ellipse d'erreur et l'intervalle de confiance calculé sous LTOP.

En analysant les tableaux 12 et 13, on constate que la précision moyenne de la position XYZ d'un point est de ± *1,5 mm.* Elle est identique à celle du jeu de coordonnées calculé sous LTOP. Du fait de la configuration du réseau étudié (pas de relief particulier), aucun écart n'est mis en évidence à la comparaison des calculs en 2D+1 (LTOP) et en 3D (TRINET+ et Comp3D).

3.2.2.3 Analyse des indicateurs de fiabilité externe

Seuls LTOP et TRINET+ proposent à l'utilisateur des indicateurs de fiabilité externe pour l'analyse d'un réseau. Ces indicateurs quantifient, dans le cas le plus défavorable, l'influence d'une faute non détectée sur la position d'un point.

L'analyse individuelle de ces indicateurs n'aide pas à détecter la présence d'une faute influençant les composantes planimétriques ou altimétriques d'un point. La fiabilité externe dépend de la précision et de la géométrie d'un réseau. En théorie, sur un réseau construit correctement, la précision et la redondance partielle des mesures sont relativement homogènes. Il en découle que la fiabilité des observations, et donc celle des points du réseau, devant être homogène, on peut s'assurer de la stabilité globale de ce réseau en confrontant les indicateurs de fiabilité externe des points les uns par rapport aux autres.

Fiabilité LTOP				
POINT	NA	NB	GIS(NA)	NH
	MM	MM	G	MM
1	1,8	0,9	102,3	1,3
2	1,4	0,9	285,5	1,4
3	1,4	1,0	286,9	1,4
4	1,0	1,0	296	1,4
5	1,0	0,9	275,6	1,1
6	1,3	0,9	95	1,1
7	1,8	1,3	294,3	1,9
8	2,0	1,5	291,5	1,8

Tableau 13: Indicateurs de fiabilité des points calculés sous LTOP

Fiabilité TRINET+			
Point	NA	Gis(NA)	Z(NA)
	[mm]	[gon]	[gon]
1	2,29	97,89	99,99
2	1,85	284,05	99,85
3	1,78	287,29	99,9
4	1,73	375,84	0,37
5	1,35	184,33	199,71
6	1,81	91,21	100,04
7	2,44	142,48	198,28
8	2,42	69,96	101,6

Tableau 14: Indicateurs de fiabilité des points calculés sous TRINET+

Les Tableau 13 et Tableau 14 présentent les indicateurs de fiabilité issus des calculs sous LTOP et TRINET+. LTOP a choisi de représenter des rectangles de plus grande fiabilité (½ petit côté : paramètres NB et ½ grand côté : paramètre NB) pour la planimétrie, et un intervalle de fiabilité (paramètre NH) pour l'altimétrie.

Du fait de sa méthode de calcul 3D, TRINET+ a opté pour la représentation de la fiabilité par le biais d'un vecteur. Le paramètre NA représente la norme de ce vecteur et les paramètres Gis(NA) et Z(NA) permettent d'orienter ce vecteur dans l'espace. Comme on l'a indiqué dans la partie 2 intitulée *Notions théoriques*, ce vecteur peut être interprété dans l'espace comme une sphère de fiabilité.

Parce que les indicateurs calculés sont différents, il est difficile de comparer ces deux tableaux et préférable de visualiser ces indicateurs.

3.2.2.4 Analyse visuelle

L'analyse visuelle d'un croquis reprenant la configuration du réseau, avec les indicateurs de précision, peut être pertinente pour contrôler son homogénéité.

Les Figure 5 et Figure 6 présentent les reports graphiques des indicateurs de précision et de fiabilité pour les calculs sous LTOP et TRINET+.

Remarque : Pour le report des indicateurs de fiabilité issus de LTOP, on a choisi de représenter un vecteur dont les composantes sont les côtés du rectangle de fiabilité. La comparaison avec le vecteur de fiabilité issu du calcul TRINET+ sera ainsi plus aisée.

Une analyse globale des deux figures permet de constater que les ellipses et ellipsoïdes d'erreur ont des tailles relativement homogènes. On constate seulement, sur les deux figures, que l'ellipse et l'ellipsoïde d'erreur associés au point 1 sont légèrement plus faibles que les autres. Cela provient du fait que ce point est rattaché à plus de points d'appui que les autres points du réseau secondaire, avec des angles d'intersection plus favorables.

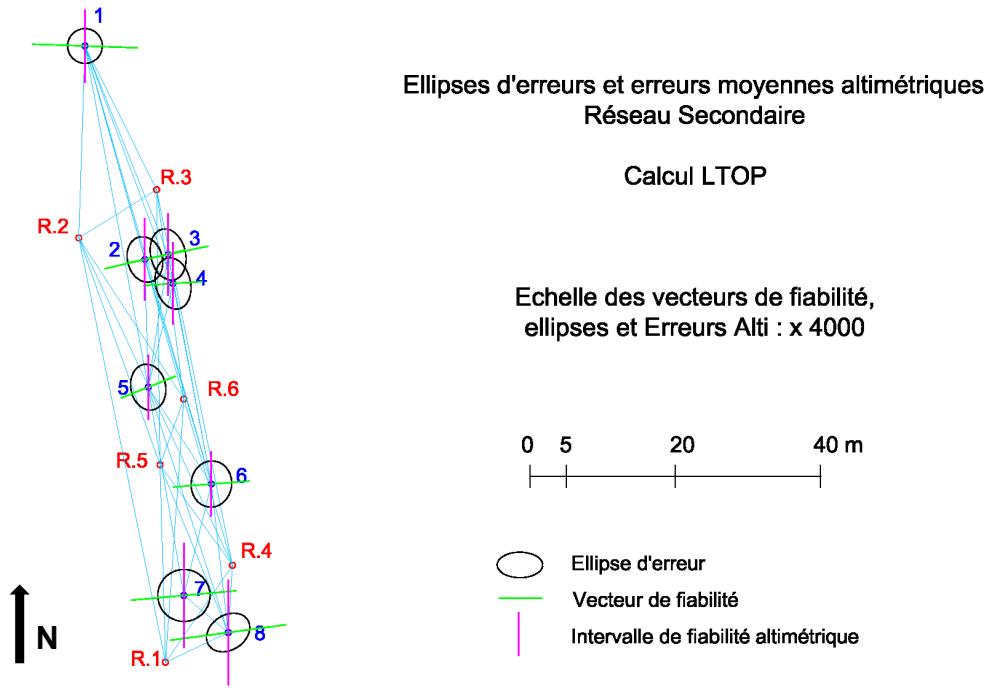


Figure 5: Croquis du réseau calculé sous LTOP avec indicateurs de précision et de fiabilité

Si l'on s'intéresse de plus près aux indicateurs de fiabilité, on constate facilement, sur la vue 3D issue de TRINET+, que la fiabilité au niveau du point 7 indique qu'une faute non détectée influencerait l'altimétrie. Sur le report des indicateurs issus de LTOP, il est plus difficile de le constater, puisque, sur ce même point 7, le vecteur et l'intervalle de fiabilité ont le même ordre de grandeur.

On déduit de ces figures que les vecteurs de fiabilité issus de TRINET+ permettent une analyse plus fine de la sensibilité d'un réseau aux éventuelles fautes non-détectables.

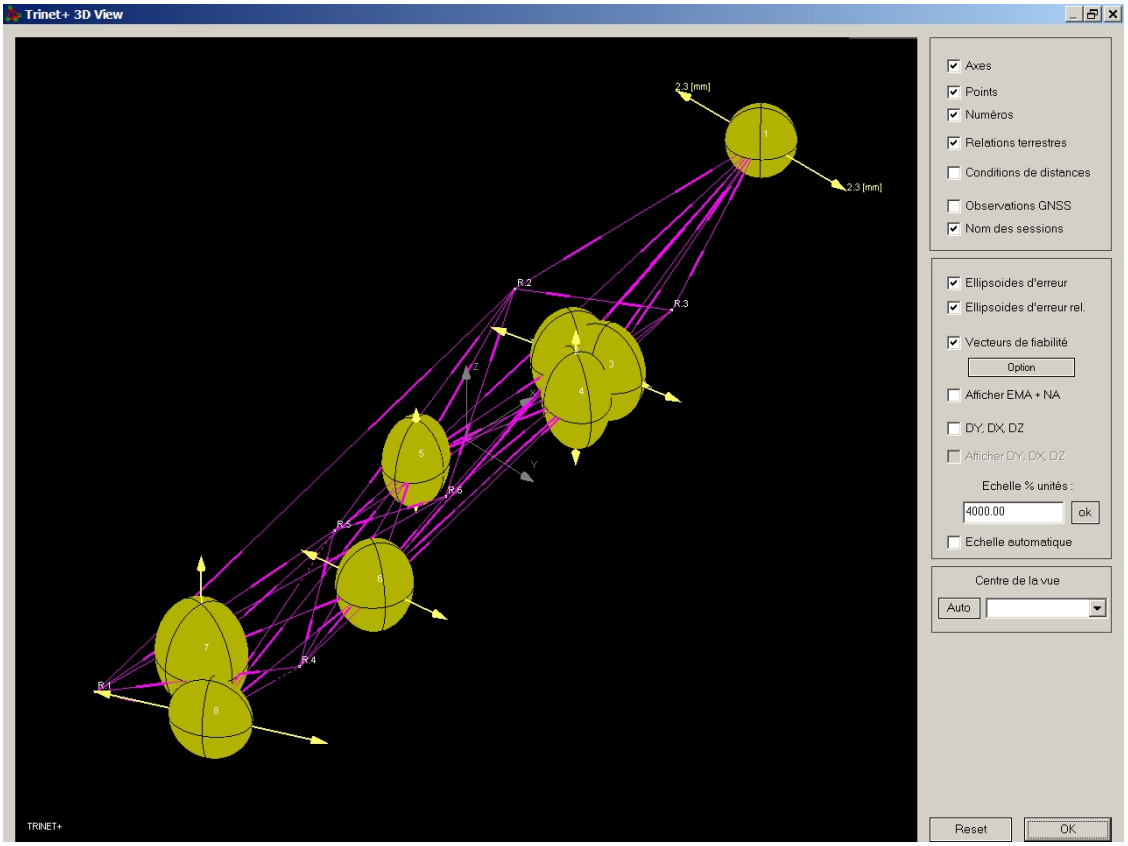


Figure 6: Vue 3D du réseau calculé sous TRINET+ avec indicateurs de précision (ellipsoïdes en vert anis) et de fiabilité (vecteurs en jaune)

3.2.3 Introduction de fautes dans les observations

Pour tester les moyens de détection de fautes mis à disposition des utilisateurs par chaque logiciel, on a volontairement introduit des fautes dans les observations.

Ces fautes introduites sont de deux types :

- Grossière : elle correspond à environ 100 fois l'écart-type sur la mesure de distance du TCRA 1101 (appareil utilisé pour le lever du réseau secondaire). Elle est introduite au niveau de la distance de la station 3 vers 2 qui est donc passée de 3,265 m à 3,465 m.
- Minime : elle correspond à environ 20 fois l'écart-type sur la mesure d'angles du TCRA 1101. Elle est introduite au niveau de la direction de la station 1 vers la station 6. Cette direction passe donc de 104,2596 à 104,2696 gon, et provoque un écart latéral à 62,90 m d'environ 1 cm.

Dans un premier temps, on a effectué une compensation avec la faute minime. Ensuite, on a testé la compensation du même réseau avec les deux fautes combinées. Sous chaque logiciel, les compensations ont été effectuées avec un calcul en mode contraint, excepté sous LTOP où l'on a aussi testé le calcul robuste.

3.2.3.1 Compensation avec faute minime

3.2.3.1.1 Résultats

La faute minime devrait affecter les coordonnées du point 6, puisqu'on l'a introduite sur la direction de la station 1 vers la station 6.

	LTOP			TRINET+		
Point	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	-0,5	-0,2	0,0	-0,6	-0,2	0,1
2	-0,3	-0,1	0,0	-0,2	-0,2	0,0
3	-0,4	-0,1	0,0	-0,4	-0,2	0,1
4	-0,4	-0,1	0,0	-0,4	-0,2	0,1
5	-0,4	-0,1	0,0	-0,5	-0,2	0,0
6	-1,0	-0,4	0,1	-1,1	-0,4	0,2
7	-0,9	-0,1	0,0	-0,9	-0,3	0,0
8	-0,7	-0,3	0,0	-0,7	-0,3	0,1

	Comp3D			LTOP robuste		
Point	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	-0,2	-0,1	0,0	-0,2	0,0	0,0
2	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
3	-0,2	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	0,0
4	-0,2	-0,1	0,2	-0,1	0,0	0,0
5	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0
6	-0,3	-0,2	0,3	-0,3	-0,1	0,1
7	-0,3	-0,1	0,1	-0,3	0,0	0,0
8	-0,4	-0,2	0,1	-0,2	-0,1	0,0

Tableau 15: Ecarts sur les coordonnées des points après introduction d'une faute minime, par rapport au jeu de coordonnées de référence

Le Tableau 15 présente les écarts constatés, après chaque calcul, sous les différents logiciels par rapport aux coordonnées théoriques des points du réseau secondaire.

Les cellules en rouge mettent en valeur les écarts sur les coordonnées du point 6, directement touchées par la faute introduite dans les observations. On constate que, dans les résultats issus de LTOP et TRINET+, les écarts sur les coordonnées sont de l'ordre du millimètre sur ce point, et plus faible sur le reste des points. La faute introduite affecte donc localement les coordonnées des points voisins du point 6.

Sous Comp3D, l'ensemble des écarts est inférieur au *½ mm*. La compensation a probablement répartie la faute minime sur l'ensemble des observations, et donc affecté tous les points du réseau.

On peut aussi noter que, dans les trois calculs présentés ci-dessus, les écarts provoqués sur les coordonnées par la faute minime sont inférieurs à la fiabilité externe calculée par les logiciels LTOP et TRINET+.

On en conclut que, dans un réseau suffisamment surdéterminé, les observations s'auto-contrôlent correctement, et l'influence d'une faute non détectée est minimisée. On comprend alors l'importance, et même la nécessité de la surabondance des observations dans les réseaux de mesures topographiques complexes.

Avec le calcul robuste, l'écart moyen sur une différence de coordonnées est de ± 0,1 mm. En affectant un poids très faible à l'observation fausse, le calcul robuste a donc permis d'obtenir des résultats proches des coordonnées de référence.

En se reportant à l'annexe A (p. 8 à 11), on pourra consulter un récapitulatif des indicateurs de précision et de fiabilité externe pour chaque calcul.

Pour les trois calculs contraints, il est intéressant de constater que les paramètres de l'ellipse d'erreur du point 6, et des autres points du réseau, n'ont que très légèrement augmenté (+10 à 15%). Si l'on n'analyse que ces indicateurs, il est difficile de mettre en cause une station en particulier. Les résultats de la compensation peuvent donc paraître corrects.

Pour le calcul robuste, les indicateurs de précision et de fiabilité de chaque point sont quasi identiques à ceux fournis par le calcul de référence.

L'analyse de ces paramètres, pour la recherche de point potentiellement faux, n'est donc pas aisée dans le cas de la présence d'une faute minime.

3.2.3.1.2 Analyse des fichiers de résultats

L'analyse approfondie des indicateurs fournis dans les fichiers de résultats peut permettre à l'utilisateur de retrouver une faute dans les observations. Chaque logiciel propose différents indicateurs offrant une aide à la recherche de faute. On en retrouve un commun aux trois logiciels : l'erreur résiduelle normée *wi*. Cet indicateur de fiabilité locale est calculé à partir du résidu d'une observation. Il permet de normaliser la distribution de l'ensemble des résidus selon une loi normale, centrée et réduite. En analysant ces *wi*, on peut facilement détecter des fautes, dans la mesure où leur nombre n'est pas trop important.

Dans les fichiers de résultats fournis par les logiciels LTOP et TRINET+, une seule erreur résiduelle hors tolérance est mise en évidence : celle qui correspond à l'observation faussée. L'utilisateur peut écarter facilement cett observation du calcul.

Dans le fichier de résultats de Comp3D, une vingtaine d'erreurs résiduelles normées sont mises en évidence. Cela laisse supposer la présence de fautes dans les observations, mais il reste difficile de détecter la faute responsable.

Avec le calcul robuste, les observations dont les résidus sont hors de la tolérance fixée par LTOP sont écartées du calcul et leur *wi* associé devient alors très significatif. LTOP fournit, en plus, un autre indicateur dénommé gi[5]. Il permet de quantifier la taille de la faute probable. S'il s'agit, par exemple, d'une erreur dans les constantes des prismes lors de la mesure des distances, l'utilisateur peut la déceler facilement grâce à l'indicateur *gi*. On pourra consulter, en annexe A, un extrait des listings de résultats issus du calcul robuste LTOP, montrant la performance des indicateurs de fiabilité *wi* et *gi* pour l'aide à la détection de fautes.

[5] On retrouve aussi cet indicateur dans les calculs contraints sous LTOP et TRINET+.

Dans le calcul robuste, avec l'introduction d'une faute minime, l'observation concernée est très bien décelée et mise en évidence par un *wi* élevé de 9.7, nettement supérieur à la tolérance fixée à 3.5. La grandeur *gi,* associée à cette observation, indique une faute probable de 1,08 *cgon*.

3.2.3.2 Compensation avec fautes combinées

3.2.3.2.1 Résultats

De même que pour le premier calcul, on devrait observer des écarts importants sur les coordonnées des points 2, 3 et 6, puisque les fautes introduites affectent directement la position relative de ces points.

Le tableau 17 présente les écarts constatés après chaque calcul sous les différents logiciels, par rapport aux coordonnées théoriques des points du réseau secondaire.

Les cellules en rouge mettent en valeur les écarts sur les coordonnées des points 2, 3 et 6 directement touchées par les fautes introduites dans les observations.

On constate que dans les résultats issus de LTOP et TRINET+, les écarts sur les coordonnées des points 2 et 3 sont de l'ordre du centimètre. La faute de 20 cm introduite affecte localement les coordonnées des points 2 et 3 et plus particulièrement les cordonnées X des points 2 et 3. Cela s'explique par le gisement d'orientation de ces points, qui est proche de 100 gon. Les écarts constatés sur le point 6 et les autres points du réseau restent de l'ordre du millimètre. On observe donc une influence plus importante de la faute grossière sur les coordonnées finales.

Le calcul robuste offre donc des résultats très satisfaisants. Les variations des coordonnées des points du réseau ne dépassent pas les 0,3 mm. On voit une nouvelle fois la puissance du calcul robuste implémenté sous LTOP.

	LTOP			TRINET+		
Point	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	-0,6	0,0	0,0	-0,6	-0,1	0,1
2	-8,6	-1,1	0,0	-11,2	-2,0	-0,4
3	7,5	1,9	0,1	10,2	2,2	0,5
4	0,4	-1,1	0,1	0,2	-0,9	0,1
5	-0,4	-0,5	0,0	-0,5	-0,5	0,0
6	-1,0	-0,6	0,1	-1,0	-0,6	0,1
7	-0,8	-0,4	0,0	-0,9	-0,5	0,0
8	-0,7	-0,4	0,0	-0,7	-0,4	0,1

	Comp3D			LTOP robuste		
Point	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
1	-0,2	-0,1	0,0	-0,2	0,0	0,0
2	-13,2	-1,6	-0,2	-0,3	0,0	0,0
3	11,8	2,9	0,3	0,1	0,0	0,0
4	1,4	-1,7	0,2	-0,1	-0,1	0,0
5	-0,2	-0,2	0,0	-0,1	0,0	0,0
6	-0,3	-0,2	0,3	-0,3	-0,1	0,1
7	-0,3	-0,2	0,1	-0,3	0,0	0,0
8	-0,4	-0,2	0,1	-0,2	-0,1	0,0

Tableau 16 : Ecarts sur les coordonnées des points après introduction des fautes combinées, par rapport au jeu de coordonnées de référence

En se reportant une nouvelle fois à l'annexe A (p. 12 à 15), on pourra aussi consulter un récapitulatif des indicateurs de précision et de fiabilité, pour chaque calcul sous LTOP et TRINET+.

Contrairement au premier calcul, on observe à présent une nette augmentation des indicateurs de précision fournis par les calculs contraints sous les trois logiciels. Ils sont de 9 à 10 fois plus importants que les indicateurs fournis par le calcul de référence. L'écart-type moyen, sur la position XYZ des points 2, 3 et 6, varie entre ± 9,7 mm et ± 11,8 mm selon les logiciels. L'écart-type sur la position XYZ de tous les points du réseau est de l'ordre de ± 10,3 mm.

En revanche, les indicateurs de fiabilité des points 2, 3 et 6 issus du calcul LTOP ne diffèrent pas sensiblement de ceux issus du calcul de référence. Le grand côté moyen (NA) des rectangles de fiabilité est passé de 1,4 mm à 1,8 mm.

Ce paramètre NA est lié au nombre et à la précision des observations entrant en jeu dans le calcul des coordonnées d'un point. Ce nombre reste ici identique. N'oublions pas que le principe de la fiabilité, tel qu'elle est implémentée dans LTOP, suppose l'intervention sur une seule faute à la fois. Or on a introduit deux fautes dans les observations. Les indicateurs calculés ne sont donc plus significatifs.

Contrairement au calcul contraint LTOP, suite à l'introduction de fautes combinées, on constate une nette augmentation des vecteurs de fiabilité calculés par TRINET+, qui atteignent une norme moyenne de 15 mm. Cette norme reste cohérente avec les écarts sur les coordonnées, provoqués par les fautes introduites, ces écarts ne dépassant pas 12 mm. Le mode de calcul des indicateurs de fiabilité de TRINET+ se révèle donc plus efficace lors de la présence de multiples fautes.

Ce calcul a permis de mettre en évidence que la présence de plusieurs fautes affectait globalement la précision des points du réseau. Tenant compte des méthodes de levers et appareils utilisés, l'utilisateur peut estimer la précision a priori des points d'un réseau. Dans ce calcul, la confrontation des précisions des points calculées a priori avec celles calculées a posteriori peut être un indicateur de la présence de fautes dans les observations.

3.2.3.2.2 Analyse des fichiers de résultats

En analysant les fichiers de résultats issus des trois calculs contraints pour tenter de détecter les fautes dans les observations, on constate que de nombreuses erreurs résiduelles normées hors tolérance sont mises en évidence. La détection de la ou des fautes responsable(s) de tous ces indicateurs hors tolérance devient très difficile.

Une faute, sur une mesure, induit souvent des valeurs *wi* élevées sur les observations voisines. Dans ce cas, pour rechercher la ou les fautes présente(s) dans les observations, il faut procéder de manière itérative en partant des *wi* les plus élevés (forte probabilité de présence d'une faute sur les mesures concernées). On commence par désactiver l'observation avec le plus gros *wi*, on relance le calcul, puis on observe le comportement des observations autour de celle que l'on vient de désactiver. On recommence ce processus de manière à écarter toutes les observations fausses.

Chacun des trois logiciels fournit à l'utilisateur un listing des observations ayant les plus grosses erreurs résiduelles normées. On peut donc facilement localiser une grosse faute dans les observations, la désactiver puis effectuer le processus itératif décrit ci-dessus pour écarter

les observations fausses du calcul. LTOP indique un *wi* maximal de 102,6 sur la distance entre les points 3 et 2, Comp3D un *wi* maximal de 243,0 sur la même distance et TRINET+ un *wi* maximal de 87,1, toujours sur la distance du point 3 vers le point 2.

Tous les logiciels détectent bien la probable faute sur l'observation concernée. Sachant que le *wi* associé est très nettement supérieur à ceux des autres observations, il est alors facile pour l'utilisateur de détecter l'observation affectée d'une faute.

Une nouvelle fois, dans cette compensation, le calcul robuste montre toute sa performance en écartant les deux observations affectées des fautes minime et grossière (*voir extrait listing de résultats de la compensation robuste en annexe A p. 16*).

3.3 Conclusion de l'étude comparative

Par ces différents calculs, on a pu démontrer la performance de la compensation robuste, qui met efficacement en évidence les deux fautes introduites dans les observations. Avec la méthode de compensation classique par les moindres carrés, il est plus difficile et laborieux de détecter les observations affectées de fautes, bien que les erreurs résiduelles normées offrent de précieux indicateurs quant à la probabilité de présence d'une faute sur une observation.

Enfin, on a pu constater que la solution de la compensation robuste est très proche de la solution réelle. Les indicateurs de précision et de fiabilité sont correctement estimés et proches des indicateurs réels. En théorie, un calcul par les moindres carrés, après élimination des observations fausses, donne un meilleur résultat que le calcul robuste. Si l'on n'a pas pu observer cette différence sur les compensations précédentes, c'est que le réseau étudié a été levé dans des conditions « laboratoires » et que le nombre de fautes introduites dans les observations était contrôlé et réduit. La grande précision du réseau (écart-type XYZ moyen ± 1,5 mm) a rendu difficile l'observation d'écarts conséquents entre les solutions des calculs robuste et par les moindres carrés.

Lors de chantiers spéciaux, la société TPLM-3D est bien souvent amenée à travailler dans des conditions difficiles. Cela peut être à cause de la topographie accidentée du terrain, de l'existence de co-activité sur le chantier, ou encore de la nature du chantier (travaux en zone industrielle dense, ou nucléaire, travaux de nuit, … etc.). Les conditions de travail extrêmes sur ces chantiers sont donc très favorables à la propagation, dans les mesures, de fautes de matricules, d'oublis, d'inattention de l'opérateur, … etc. Ces fautes peuvent sensiblement dégrader les calculs de compensation. Aussi, pour ces chantiers complexes, la méthode de compensation robuste est très efficace. Elle permet un gain de temps considérable pour détecter des fautes dans des réseaux comportant plusieurs centaines de mesures. Bien entendu, elle ne fonctionne correctement qu'avec l'hypothèse de la surabondance de données, permettant un auto-contrôle et un nombre de fautes limité.

En conclusion, le choix d'intégrer LTOP comme logiciel de compensation à ses processus de traitement est pertinent pour TPLM-3D. Ce logiciel dispose de bons outils permettant une analyse fine de la précision et de la fiabilité d'un réseau, tout en écartant efficacement les observations entachées de fautes.

Partie 4 : Expériences et Analyses

Suite à l'étude comparative menée sur la base d'un calcul sous les logiciels LTOP, TRINET+ et Comp3D dans la troisième partie de ce mémoire, nous avons pu valider le choix de TPLM-3D d'intégrer LTOP à ses méthodes de travail. LTOP étant déjà utilisé dans l'entreprise depuis plusieurs années en production, dans le cadre de chantiers pour le compte de la Mensuration Officielle Genevoise, une chaîne informelle de traitement a été mise en place pour la compensation de réseaux de mesures.

Aucune procédure n'ayant été définie, cette chaîne de traitement n'est pas forcément optimisée et ne tient pas compte de toutes les possibilités de configuration du logiciel LTOP. Ainsi, l'objectif de cette partie est de tester la chaîne de traitement actuelle à travers des calculs de réseau, afin d'y apporter des propositions d'optimisation.

Nous présenterons dans un premier paragraphe la chaîne de traitement actuelle. Puis, à travers des calculs-tests imposant une configuration particulière de LTOP, nous tenterons de dégager des propositions d'amélioration de cette chaîne de traitement. Ceci permettra d'optimiser l'utilisation de LTOP et de rendre moins ardue la compensation d'un réseau.

4.1 Présentation de la chaîne de traitement actuelle

4.1.1 Processus de traitement

La procédure actuelle de compensation d'un réseau sous LTOP nécessite l'utilisation simultanée de plusieurs logiciels. La figure 7, ci-dessous, présente un diagramme schématisant l'appel des différents logiciels au cours d'un calcul de compensation.

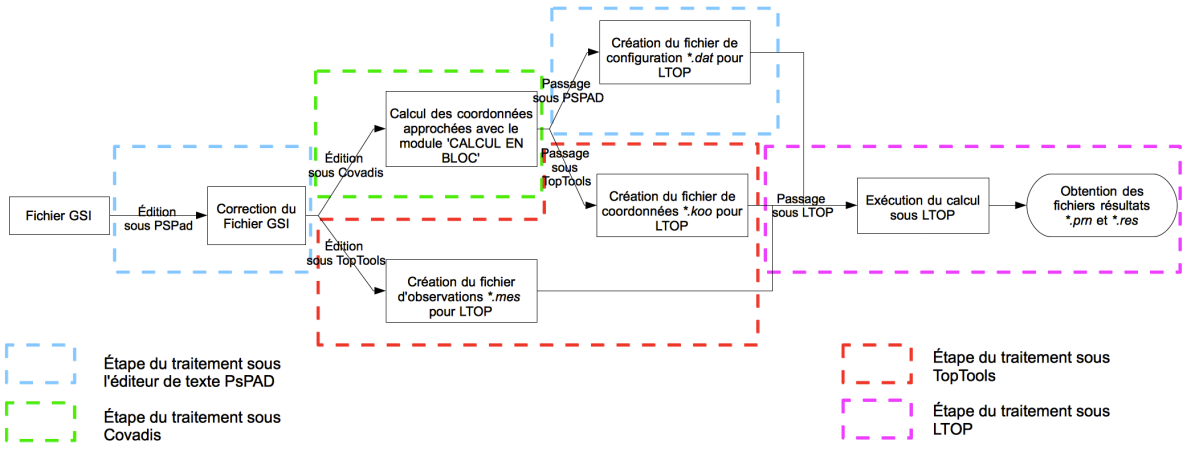

Fichier GSI
Édition sous PSPad
Correction du Fichier GSI
Édition sous Covadis
Édition sous TopTools
Calcul des coordonnées approchées avec le module 'CALCUL EN BLOC'
Création du fichier d'observations *.mes pour LTOP
Passage sous PSPAD
Passage sous TopTools
Création du fichier de configuration *.dat pour LTOP
Création du fichier de coordonnées *.koo pour LTOP
Passage sous LTOP
Exécution du calcul sous LTOP
Obtention des fichiers résultats *.prn et *.res
Étape du traitement sous l'éditeur de texte PsPAD
Étape du traitement sous Covadis
Étape du traitement sous TopTools
Étape du traitement sous LTOP

Figure 7: Chaîne de traitement actuelle pour la compensation d'un réseau sous LTOP

L'éditeur de fichier PSPad est utilisé pour la correction du fichier d'observations brut *.GSI (en parallèle avec TopTools), puis pour la préparation du fichier de configuration du calcul LTOP.

La fonction de calcul en bloc de l'applicatif Covadis est utilisée pour le calcul des coordonnées approchées, calcul nécessaire à l'initialisation de la compensation sous LTOP.

L'application TopTools, issue de développements internes à TPLM-3D, est employée pour la génération des fichiers d'observations **.mes* et des fichiers de coordonnées **.koo,* propres à LTOP.

Enfin le logiciel LTOP est utilisé pour les différentes étapes des calculs de compensation.

4.1.2 L'application TopTools

À l'origine, TopTools est un logiciel créé par David Desbuisson, qui rassemblait quelques fonctions d'aide à la préparation d'un calcul sous LTOP. Il permettait ainsi de préparer un fichier d'observations *.GSI pour le transformer au format *.mes de LTOP, et aussi de transformer un fichier de coordonnées au format *.koo, propre à LTOP.

La Figure 8 présente le schéma de principe du fonctionnement des modules d'interprétation des carnets de terrain *.GSI et la création de fichier de coordonnées au format LTOP.

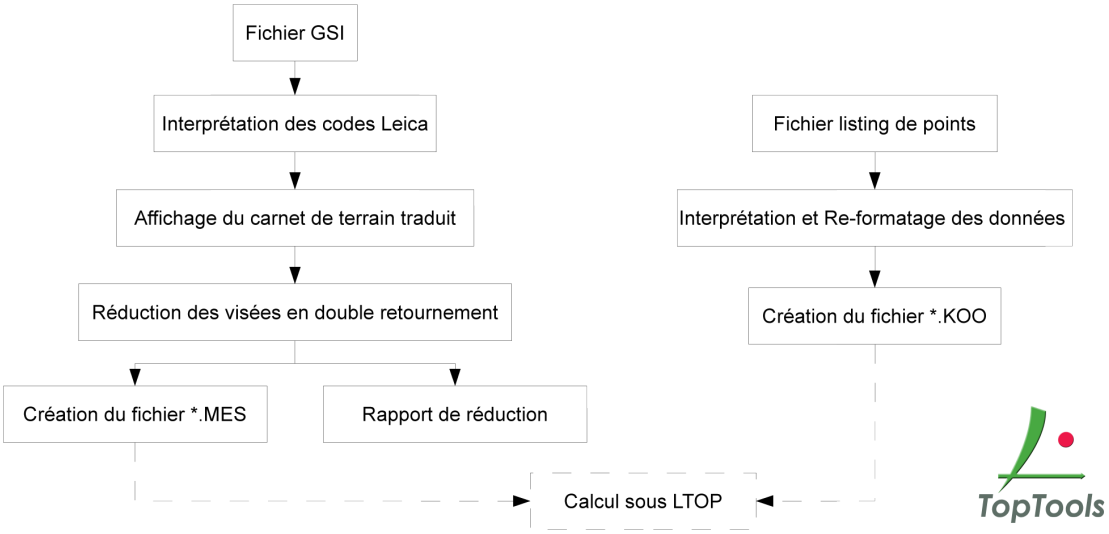


Figure 8: Schéma de principe de fonctionnement des fonctions natives du logiciel TopTools

TopTools a été développé suite à une augmentation du nombre de chantiers en Suisse nécessitant l'utilisation du logiciel LTOP. David Desbuisson souhaitait avoir un outil, simple d'utilisation, permettant de contrôler et de corriger des fichiers *.GSI. Ainsi, l'interprétation des données et le rapport de réduction des visées en double retournement fournissent à l'utilisateur une bonne aide pour cette étape de contrôle, préalable à tout calcul (cf. Figures 9 et 10).

TPLM-3D souhaitait faire de TopTools une « boîte à outils » proposant de multiples options de calcul autour des traitements de carnets de terrain *.GSI. Au cours de son projet de fin d'études, Élodie Hermier [2011], a ainsi ajouté des modules de calcul permettant le géo-référencement global d'un réseau de cibles, réseau issu d'un lever sur plateforme flottante.

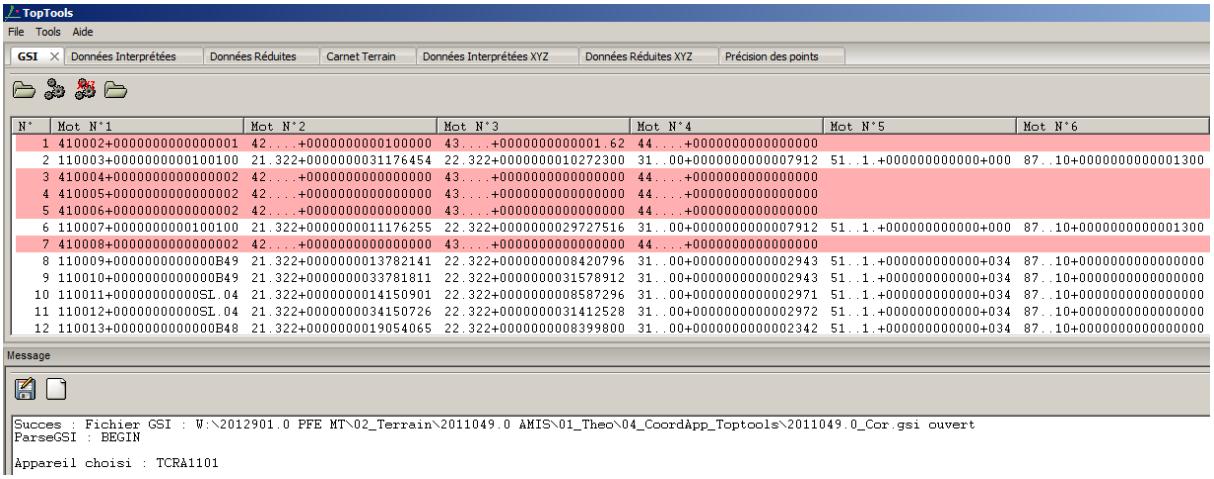
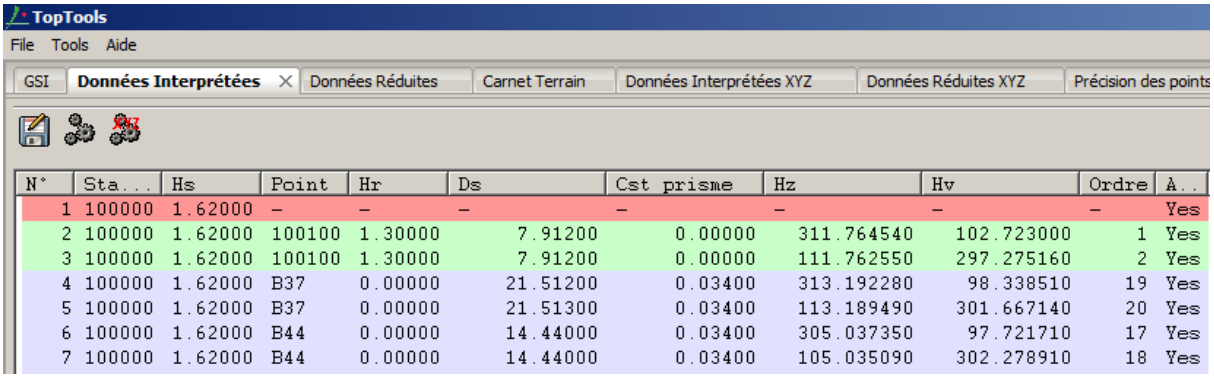


Figure 9: Extrait d'un fichier GSI chargé sous TopTools. En rouge, les lignes correspondant à des codes station ou référence



N°	Sta...	Hs	Point	Hr	Ds	Cst prisme	Hz	Hv	Ordre	A..
1	100000	1.62000	–	–	–	–	–	–	–	Yes
2	100000	1.62000	100100	1.30000	7.91200	0.00000	311.764540	102.723000	1	Yes
3	100000	1.62000	100100	1.30000	7.91200	0.00000	111.762550	297.275160	2	Yes
4	100000	1.62000	B37	0.00000	21.51200	0.03400	313.192280	98.338510	19	Yes
5	100000	1.62000	B37	0.00000	21.51300	0.03400	113.189490	301.667140	20	Yes
6	100000	1.62000	B44	0.00000	14.44000	0.03400	305.037350	97.721710	17	Yes
7	100000	1.62000	B44	0.00000	14.44000	0.03400	105.035090	302.278910	18	Yes

Figure 10: Extrait d'un GSI interprété sous TopTools. En rouge, la ligne de station, en vert les lignes de références, et en bleu les mesures de points de détails

4.2 Test et évaluation de la chaîne de traitement

Dans ce paragraphe, on s'intéressera à l'ajustement de deux réseaux mis en place sur le parking de TPLM-3D. Ces réseaux s'inspirent des configurations particulières rencontrées sur des chantiers de l'entreprise. Le premier réseau, intitulé « Conduite forcée » est une polygonale réalisée dans des conditions similaires à celle d'une conduite de barrage. Le second, intitulé « Descente de Point » est une boucle, réalisée dans les étages des bureaux de TPLM-3D, avec des visées zénithales très contraignantes.

À travers les compensations de ces deux réseaux, qui nécessitent un paramétrage particulier de LTOP, on cherche à mettre en évidence les points faibles de la chaîne de traitement, pour proposer par la suite des pistes d'optimisation.

4.2.1 Réseau "Conduite Forcée"

4.2.1.1 Plan de réseau

La Figure 11 présente un plan du réseau « Conduite Forcée » implanté sur le parking de TPLM-3D. Ce réseau s'inspire d'un réseau mis en place pour la réalisation de profils transversaux dans la conduite forcée d'un barrage. On a tenté de recréer les conditions de lever de ce chantier en implantant une configuration similaire.

Ce réseau est constitué de trois blocs principaux : deux blocs permettent de rattacher au réseau de base l'entrée et la sortie de la conduite (point 1 et 12), le troisième bloc étant la polygonale mise en œuvre dans la conduite.

Le rattachement du réseau s'effectue sur les points R1, R2, R3 et R5 issus du réseau primaire mis en place précédemment.

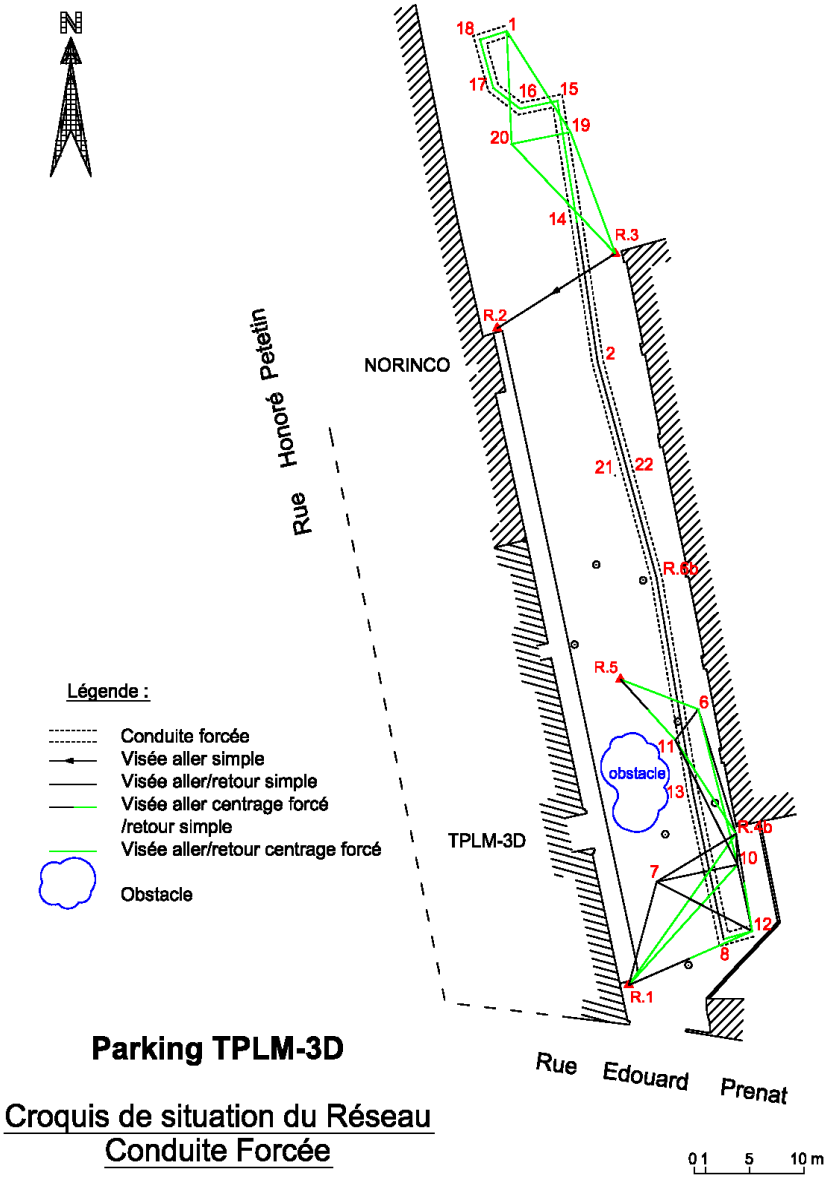


Figure 11: Plan du réseau "Conduite Forcée"

4.2.1.2 Conditions de lever

Pour se rapprocher des conditions réelles de lever, on a considéré que les visées de rattachement entre les points connus R1 et R5 ne pouvaient être directes à cause de l'obstacle. Ainsi, les blocs de rattachement de l'entrée et de la sortie de la conduite ont été levés avec la méthode du centrage forcé.

Pour modéliser les conditions de lever dans la conduite forcée, on a simplement contraint une polygonale classique dans un couloir linéaire d'une largeur d'environ 2,50 m.

4.2.1.3 Contraintes de calcul

Pour affiner le modèle stochastique a priori sous LTOP, on souhaite différencier dans le fichier d'observations LTOP les visées issues d'un lever en centrage forcé et celles issues d'un lever classique. On pourra ainsi, dans les calculs, donner plus de poids aux observations issues du lever en centrage forcé, et donc améliorer le rattachement des points d'entrée et de sortie de la conduite forcée.

Cette différenciation des visées en centrage forcé par rapport à celles issues d'un lever classique se matérialise par l'édition du fichier d'observations LTOP. On peut ajouter, à chaque ligne de station ou d'observation, l'erreur de centrage de l'appareil ou du prisme. Ainsi, en indiquant une erreur de centrage de *0,1 mm* pour les visées en centrage forcé, on peut affiner le modèle stochastique a priori.

On pourra consulter, en Annexe D (pages A à J), une note descriptive du fichier d'observations LTOP récapitulant tous les types d'observations acceptés, et les endroits où sont spécifiées des erreurs de centrage particulières.

4.2.1.4 Résultats

Les résultats obtenus sont très bons. La précision moyenne sur la position XYZ des points du réseau est de 1,5 mm.

On pourra consulter, en Annexe B (p. 2), les résultats des calculs sous LTOP qui récapitulent, pour chaque point nouveau, les coordonnées compensées, les indicateurs de fiabilité et de précision.

4.2.2 Réseau « Descente de point »

4.2.2.1 Plan de réseau

La figure 12 présente un plan du réseau « Descente de Point » implanté dans les étages des bureaux de TPLM-3D. Ce réseau est une boucle, réalisée avec des visées zénithales très contraignantes, c'est-à-dire proches du zénith ou du nadir.

Le rattachement de la boucle s'effectue sur le point 13 du réseau secondaire, sur lequel on a effectué un tour d'horizon sur les points R1, R4, R5 et R6, issus du réseau primaire. Les points 50 et 51B sont situés au rez-de-chaussée des bureaux. Le point 51 est situé sur le palier intermédiaire des escaliers montant au 1er étage. Les points 51C, 52, 53 et 54 sont situés au 1er étage. Enfin, les points 13 et 55 sont situés sur le parking.

4.2.2.2 Conditions de lever

Dans le réseau implanté, on trouve à plusieurs reprises de fortes dénivelées entre stations. Cela se répercute dans les observations, au niveau des angles verticaux qui sont assez défavorables pour le calcul de l'altimétrie. On trouve, par exemple, des visées zénithales entre les points 54 et 55, proches de 170 gon.

Pour éviter de petites erreurs de centrage et de bullage des prismes au niveau de ces points, erreurs qui pourraient se répercuter sur la précision a posteriori, on a levé une partie de la boucle en centrage forcé (visées en vert sur la figure 12). On a aussi porté une grande attention à la mesure des hauteurs des stations, afin d'affiner la précision altimétrique des points.

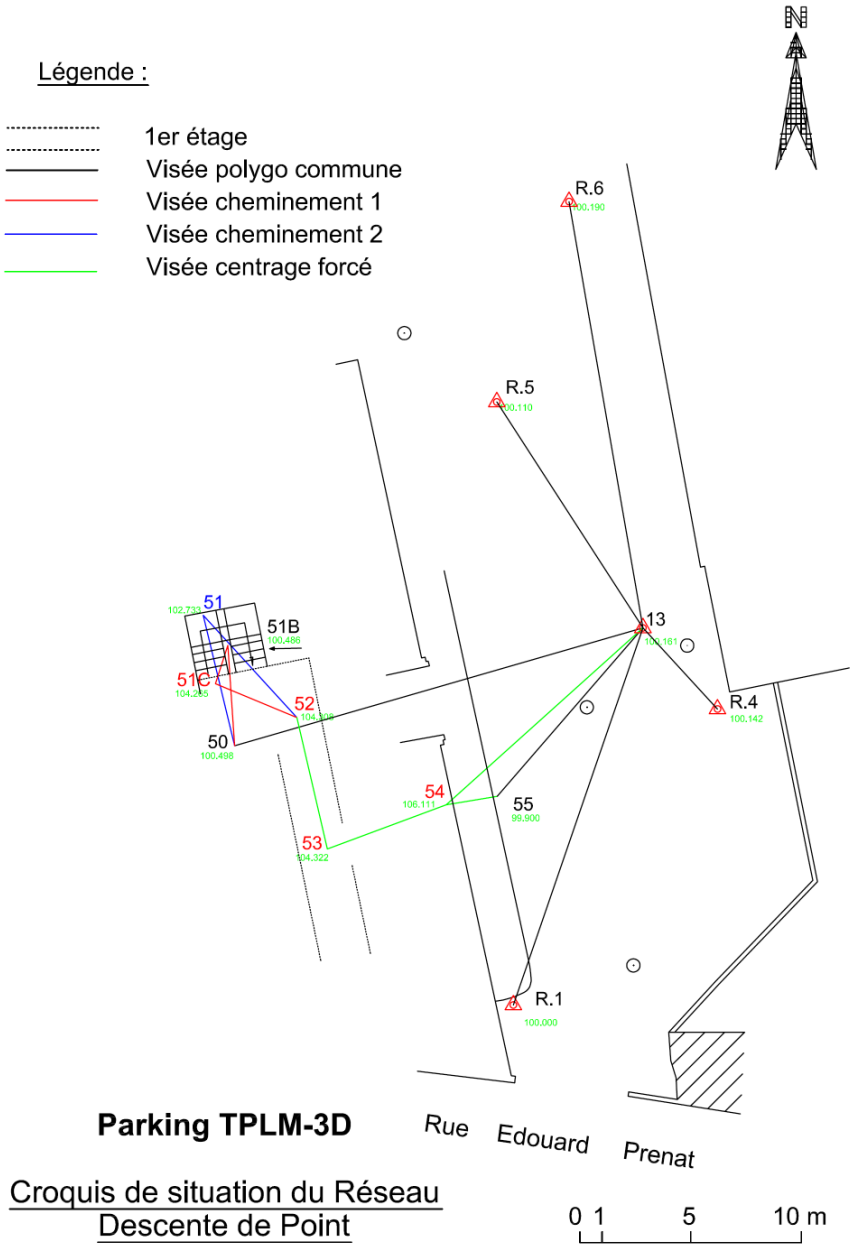


Figure 12: Plan du réseau "Descente de Point"

4.2.2.3 Contraintes de calcul

De la même manière que pour le réseau précédent, on a différencié, dans le fichier d'observations, les visées en centrage forcé des visées issues du lever classique.

Sous LTOP, il est possible de définir de manière globale la précision des mesures des angles verticaux dans le fichier de paramétrage du calcul. Or, on sait que l'influence de l'erreur de collimation verticale est plus importante sur les visées très inclinées. Cette erreur est éliminée par la réduction des visées issues du double retournement.

Il peut cependant subsister de petites erreurs sur les mesures de ces angles, erreurs dues à la difficulté de réaliser un pointé précis des cibles. Pour diminuer le poids des angles verticaux proches du nadir ou du zénith, on peut alors affecter, dans le fichier d'observations, des *emq* a priori plus importantes sur les visées concernées.

En annexe D (p. 36), on pourra consulter la description du fichier d'observations LTOP. Dans cette note descriptive sont définis les endroits où l'on peut affecter des erreurs moyennes a priori propres à chaque mesure.

4.2.2.4 Résultats

Les calculs de la boucle ont été effectués selon différents cheminements, notamment au niveau de la montée dans les escaliers (points 50-51-52 ou points 50-51B-51C). On a pu ainsi analyser l'impact des différents chemins empruntés sur la précision des points implantés dans les étages.

On pourra consulter, en Annexe B (p. 6), les résultats des calculs sous LTOP.

4.3 Bilan et propositions d'optimisation de la chaîne de traitement

Suite à ces deux calculs, on a pu mettre en évidence plusieurs points faibles de la chaîne de traitement.

On a constaté que la **procédure de calcul est contraignante**, car elle nécessite l'utilisation simultanée de plusieurs logiciels. Or la démultiplication des logiciels peut être une perte de temps considérable. La conversion des formats de données peut aussi entraîner une perte d'informations.

L'utilisation de Covadis pour le **calcul préalable des coordonnées approchées** n'est pas un choix optimal pour les chantiers spéciaux de TPLM-3D. En effet, comme on l'a remarqué dans la partie 3 de ce mémoire, les conditions de travail sur les chantiers spéciaux de TPLM-3D sont favorables à la propagation de fautes dans les observations. D'après l'étude menée dans cette partie, on a conclu que LTOP fournissait suffisamment d'outils pour une aide à la détection des fautes. Cependant, ces outils fonctionnent correctement seulement si les coordonnées approchées sont justes (à une précision près relative à la taille du chantier. Par exemple : à un mètre près pour un chantier où les visées inter-points dépassent les 100 mètres) Or, l'outil de calcul en bloc de Covadis ne fournit pas suffisamment d'indicateurs sur la fiabilité des points calculés et des observations du réseau. Pour le calcul des réseaux de ces chantiers particuliers, il pourrait donc être intéressant de disposer d'un algorithme de calcul

robuste de coordonnées approchées, permettant d'écarter au fur et à mesure les observations entachées de fautes.

Par ailleurs, on a aussi remarqué que **l'édition des fichiers d'observations LTOP n'est pas aisée** sous un éditeur de texte classique (PsPad). Le format de fichier *.mes est un format de type « colonné », c'est-à-dire que les données doivent être entrées dans des colonnes, dont le nombre de caractères est défini au préalable. Ainsi, si les numéros de colonnes ne sont pas respectés pour l'insertion des données, l'interprétation ultérieure sous LTOP peut être mauvaise. Le calcul devient alors impossible.

On comprend alors que, sur un fichier comportant plusieurs milliers de lignes d'observations, l'affectation d'erreurs de mesure ou de centrage à quelques unes de ces mesures devient compliquée et source d'erreurs de formatage.

Ces différents calculs ont aussi permis de mettre en évidence que **l'édition des fichiers de configuration n'est pas aisée**. On dispose de trois solutions pour l'édition de ces fichiers :

- Par le biais des masques en lignes de commandes DOS : cette solution est peu aisée pour un utilisateur n'étant pas familiarisé avec la manipulation des commandes du système MS-DOS.
- Par le biais de l'interface LTOPWIN : cette solution est sûrement la plus simple pour configurer un calcul, bien qu'elle ne soit pas toujours très pratique, notamment au niveau de l'éditeur des points, qui permet de définir les points fixes du réseau.
- Par le biais d'un éditeur de fichier texte : cette dernière solution est extrêmement difficile puisqu'elle suppose de connaître la signification de toutes les lignes de code du fichier de configuration, lignes associées à la définition des paramètres de calcul.

Sur des réseaux denses et/ou de grande taille, il est parfois utile de visualiser un schéma d'ensemble, avec des informations relatives à la précision et à la fiabilité. Ainsi, il serait intéressant de disposer d'un **module de visualisation**, ou d'une fonction d'export au format *.dxf des indicateurs de précision et de fiabilité du réseau, afin de faciliter l'analyse de sa stabilité et de son homogénéité. Cette analyse pourrait permettre de détecter des zones du réseau affectées de fautes ou de localiser des points de rattachement peu précis.

Enfin, on a pu constater que la mise en forme **des fichiers de résultats LTOP n'est pas optimale**. Le résumé des informations les plus importantes (test global, quotient des erreurs moyennes, modèle stochastique, ...) de la compensation se trouve dans les dernières pages. Il serait préférable d'avoir à disposition les informations importantes sur les résultats dès le début du fichier. De plus, LTOP, pour chaque point nouveau d'un réseau, effectue des tests sur des niveaux de précision et de fiabilité qui sont propres à la Mensuration Officielle Suisse. On souhaiterait pouvoir configurer les tests de passage du niveau de précision et de fiabilité en fonction du type de chantier.

Les problèmes évoqués ci-dessus dans le déroulement des calculs nuisent à la chaîne de traitement et rendent l'analyse des résultats complexe et plus fastidieuse. Ils pourront être résolus par des développements informatiques et des ajouts de fonctions au logiciel TopTools.

Partie 5 : Développements

Suite à l'étude menée dans la partie 4 de ce mémoire, on a pu mettre en évidence les points faibles de la chaîne de traitement actuelle pour la compensation des réseaux de mesures topographiques sous LTOP. Le souhait exprimé par TPLM-3D est de simplifier au maximum cette chaîne de traitement pour la rendre accessible aux ingénieurs comme aux techniciens de l'entreprise. Outre l'écriture d'un mode opératoire clair - rappelant les modes de configuration particuliers de LTOP, l'utilité de chaque paramètre de calcul et la procédure de réalisation d'une compensation -, il a fallu définir plusieurs axes de développement informatique en vue de concrétiser les propositions d'optimisation évoquées au chapitre précédent.

Ainsi, dans le premier paragraphe de cette partie, nous établirons un cahier des charges des grands axes de développement permettant l'optimisation de la chaîne de traitement pour TPLM-3D. Dans un second temps, nous expliquerons la « philosophie » du développement envisagé pour l'algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées pour le logiciel TopTools. Nous terminerons par les problèmes liés à l'implémentation de cet algorithme.

5.1 Cahier des charges

Suite à la réflexion menée à l'issue de la partie *Expériences et analyses*, on a pu définir un certain nombre de propositions d'amélioration de la chaîne de traitement actuellement en place dans les procédures de TPLM-3D.

Tous les développements informatiques proposés ont été envisagés pour le logiciel TopTools. L'objectif était d'ajouter un groupe de fonctions à ce logiciel afin de simplifier la chaîne de traitement et de réduire l'utilisation simultanée de plusieurs logiciels.

5.1.1 Classification des axes de développement informatique

Les axes de développement de fonctions pour TopTools sont classés ci-dessous par ordre d'importance pour l'évolution de la chaîne de traitement proposée dans le paragraphe 5.1.2 (cf. Figure 13) :

- Création d'un module de calcul robuste de coordonnées approchées : Le module permet de calculer des coordonnées approchées avec un bon niveau de fiabilité, même en présence de fautes dans les observations. Cela permet de s'assurer que la qualité des coordonnées approchées est suffisante pour que les fonctionnalités de LTOP portant sur la recherche de fautes fonctionnent de façon optimale.
- Création d'un format de fichier spécifique pour TopTools : La création de ce format permet de gérer une structure universelle des données, pour tous les modules de calcul intégrés à TopTools. L'utilisateur peut ainsi gérer plus simplement la modification et la correction des GSI interprétés sous TopTools. Il peut ajouter des erreurs de centrage, et des précisions particulières pour certaines visées, et ainsi générer plus facilement des fichiers d'observations LTOP complets.

- Création d'un module de visualisation : Ce module permet de visualiser les indicateurs de fiabilité et/ou de précision calculés par LTOP, à une échelle fixée par l'utilisateur. Ce module apporte une aide à l'utilisateur pour la recherche de fautes sur de grands réseaux. Il peut ainsi identifier, plus facilement que par l'analyse des fichiers de résultats, un comportement local indésirable (provoqué par une observation entachée d'une faute ou un point de rattachement trop imprécis).
- Création d'un module de configuration d'un calcul LTOP : Ce module a pour vocation de simplifier la génération de fichiers de configuration de calcul LTOP. En effet, sur les chantiers, TPLM-3D utilise régulièrement les mêmes appareils topographiques, projections, systèmes de coordonnées locales. De plus, certains paramètres restent fixes selon l'étape de la compensation (calculs libre, libre-ajusté, contraint et robuste). En fixant par défaut ces paramètres, on diminue l'intervention de l'utilisateur dans la configuration du calcul, et par conséquent le risque d'erreur.
- Mise en page des fichiers de résultats avec un formalisme propre à TPLM-3D : Ce module permet de simplifier l'analyse des fichiers de résultats de manière à mettre en évidence plus rapidement les informations les plus importantes du résumé d'un calcul LTOP. Il permet aussi à l'utilisateur de fixer ses propres seuils de tolérance, en terme de précision et de fiabilité, en fonction des recommandations des clients.

Le langage de programmation imposé pour les développements informatiques est le C++.

Tous les axes de développement informatique cités ci-dessus nécessitent l'implémentation, plus ou moins complexe, de plusieurs fonctions. Pour un novice, ne connaissant pas le langage de programmation orienté-objet C++, le travail est considérable. Il ne peut, par conséquent, pas s'étaler sur la durée prévue de ce projet de fin d'études.

Dans la suite de ce mémoire, on s'intéressera donc plus particulièrement à l'algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées développé au cours de ce projet de fin d'études.

5.1.2 Nouvelle chaîne de traitement

La Figure 13 présente un diagramme schématisant la nouvelle chaîne de traitement, suite aux développements informatiques préconisés. Elle ne nécessitera plus que l'utilisation de deux logiciels, TopTools et LTOP.

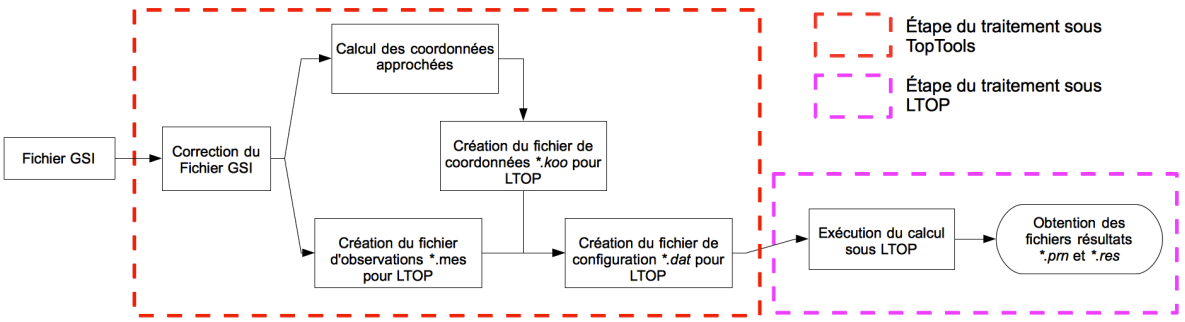

Étape du traitement sous TopTools
Étape du traitement sous LTOP
Fichier GSI
Correction du Fichier GSI
Calcul des coordonnées approchées
Création du fichier de coordonnées *.koo pour LTOP
Création du fichier d'observations *.mes pour LTOP
Création du fichier de configuration *.dat pour LTOP
Exécution du calcul sous LTOP
Obtention des fichiers résultats *.prn et *.res

Figure 13: Nouvelle chaîne de traitement

5.1.3 Enjeux du développement de TopTools pour TPLM-3D

Le développement du logiciel TopTools destiné à l'optimisation de la chaîne de traitement mise en place pour les calculs de compensation sous LTOP, représente de nombreux enjeux pour l'entreprise.

En premier lieu, cela apporte un gain de temps et une meilleure gestion des données. L'utilisateur n'a plus à naviguer entre plusieurs logiciels. Toutes les étapes de pré-traitement d'un calcul de compensation sont réunies au sein d'un seul logiciel. On écarte donc le risque de perte d'informations dû à des conversions de formats de données entre logiciels.

Cela apporte aussi davantage de clarté pour les utilisateurs. Les fonctions développées pour TopTools étant définies selon les besoins de l'entreprise, les algorithmes écrits sont plus adaptés aux besoins spécifiques de l'entreprise. La compréhension et la maîtrise du logiciel sont optimisées et la formation des employés est simplifiée.

Enfin, le développement d'un logiciel en interne offre à l'entreprise un réel avantage pour l'adaptabilité de ces processus de traitement à tous les types de chantiers et demandes spécifiques des clients.

5.2 Le langage de programmation C++

Le langage de programmation C++, officiellement nommé en 1983, est issu du langage de programmation C, lui-même développé, dès 1973.

C++ est un langage de programmation dit « orienté objet », c'est-à-dire un modèle de programmation dans lequel on considère non plus des fonctions, avec des procédures et paramètres, mais des objets qui possèdent leurs propres méthodes et propriétés.

Ce langage possède les avantages suivants :

- portabilité entre différents systèmes d'exploitation ;
- brièveté du code, en comparaison avec d'autres langages de programmation ;
- compatibilité avec C ;
- rapidité, efficacité du code.

L'environnement de programmation et de développement, utilisé pour la compilation des codes écrits, est le logiciel Microsoft Visual Studio 2010. Ce logiciel possède un ensemble d'outils très complets pour le développement et la génération d'applications dans divers langages de programmation.

5.3 Algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées

5.3.1 Définition des objectifs

L'algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées créé pour TopTools doit répondre aux problèmes soulevés dans le cahier des charges (cf. § 5.1).

Il existe déjà quelques logiciels permettant d'effectuer du calcul de coordonnées approchées.

Le logiciel NAEKO, développé au sein de l'organisme Swisstopo, a fait l'objet d'une publication dans le *Bulletin du Centre de Calcul de l'Office Fédéral* n°17, [1989]. Cependant, aujourd'hui, ce programme n'est plus commercialisé auprès du grand public. Y.Egels [2003], a aussi développé, pour une utilisation interne à l'IGN, un programme dénommé CAP faisant partie du logiciel Comp3D.

En se basant sur l'étude de ces logiciels, ainsi que sur d'autres programmes allemands, C. Million [1994] a défini, dans un article de la revue *Géotop,* les conditions que doivent remplir de tels programmes :

- **Acceptation de toutes sortes de données et d'observations** (angles horizontaux et verticaux, azimuts, distances inclinées ou horizontales réduites dans un plan de projection, dénivelées issues d'un nivellement direct ou indirect… etc.) . Dans notre cas, on se limitera aux observations issues d'un fichier *.GSI. Pour les données, on acceptera des points connus, en planimétrie ou altimétrie, ainsi que des gisements d'orientation.
- **Contrôle des mesures.** On tentera de mettre en place cette condition dans notre algorithme par la mise en place d'un contrôle initial des observations réduites, et d'un contrôle systématique des points approchés par des compensations robustes locales.
- **Classification des points approchés selon la qualité de leur détermination.** Cette condition sera réalisée par la mise en place d'un niveau de fiabilité de détermination des points approchés et l'affectation d'un statut définitif, non contrôlé ou douteux, aux points approchés.

5.3.2 Structure générale de l'algorithme

La figure 14 présente la structure générale de l'algorithme développé pour TopTools. Pour conserver la philosophie de calcul de LTOP et simplifier l'écriture de l'algorithme, les calculs de la planimétrie et de l'altimétrie ont été séparés.

Trois blocs de fonctions ont été définis pour l'organisation du développement de l'algorithme.

Le premier bloc comporte tout un groupe de fonctions permettant de structurer les données initiales nécessaires au calcul, ainsi que des fonctions permettant de décrire la topologie du réseau.

Le second bloc comporte une fonction de compensation robuste d'un réseau altimétrique, à partir de dénivelées partielles entre points calculés au préalable lors de la structuration des données.

Enfin, le dernier bloc comporte toutes les fonctions nécessaires au calcul de la planimétrie d'un réseau. On a ainsi créé :

- une fonction permettant de calculer les V0 de toutes les stations du réseau ;
- une fonction de calcul itératif à partir d'opérateurs de calculs élémentaires (rayonnement, intersection, relèvement … etc.) ;
- une fonction de contrôle local de la fiabilité d'un point par un calcul robuste de *triangulatération*[6].

[6] Ce mot valise est composé de *Triangulation* et *Trilatération*. Il s'agit donc d'une compensation d'un point à partir de mesures d'angles et de distances.

5.3.3 Topologie du réseau

Pour faciliter l'accès aux observations du réseau lors des calculs, il faut décrire la topologie du réseau au début de l'algorithme, c'est-à-dire les relations de proximité entre les points du réseau.

On a géré cette étape de programmation avec les outils proposés par la librairie *opensource* Boost Graph en langage C++.

On retrouve dans cette librairie toute une série de fonctions issues de la théorie des graphes, permettant de créer des graphes, d'associer des données aux nœuds et arêtes qui constituent un graphe, ou encore d'effectuer des opérations permettant de tester les relations d'adjacence et d'incidence entre nœuds.

Suite à la structuration des données permettant d'initialiser le calcul de coordonnées approchées, on a généré trois types de graphes pour trois groupes distincts de données réduites : les dénivelées partielles, les distances réduites à l'horizontale, et les angles horizontaux.

Des opérations sur ces graphes peuvent, par exemple, permettre de déterminer si un point est calculable - par rayonnement, relèvement, intersection…. -, ou encore si le v0 d'une station est calculable.

On comprend donc qu'une rigoureuse structuration des données et une description détaillée de la topologie d'un réseau sont des conditions indispensables à la bonne gestion des calculs.

5.3.4 Les méthodes de calcul retenues

5.3.4.1 Pour l'altimétrie du réseau

On sait que le modèle fonctionnel de la compensation altimétrique est linéaire. Ainsi, il n'est pas nécessaire de disposer des valeurs approchées des altitudes des points pour pouvoir effectuer une compensation en bloc d'un réseau de dénivelées partielles.

On a donc choisi de compenser de manière globale les dénivelées partielles du réseau.

5.3.4.2 Pour la planimétrie du réseau

La détermination des coordonnées planimétriques d'un réseau est totalement soumise à la configuration de celui-ci, ainsi qu'à la distribution des points de rattachement. Ainsi, il est difficile de généraliser ce problème afin de trouver une méthode de calcul de coordonnées approchées applicable à tous les réseaux de points.

On a donc retenu une méthode de calcul des points approchés « par filiation successive » définie par C. Million [1994]. Pour ce faire, on utilise un certain nombre d'opérateurs de calculs élémentaires, permettant de déterminer les coordonnées d'un point avec un minimum de données.

En pratique, dans l'algorithme écrit, on a mis en place une boucle itérative sur tous les points du réseau. La boucle recherche, lorsqu'elle découvre un point inconnu, la possibilité d'exécuter un calcul à partir d'un des opérateurs de calculs définis dans le Tableau 17.

L'ordre des opérateurs élémentaires choisi pour la recherche des possibilités d'exécution de calculs est celui indiqué dans le Tableau 17. Il a été défini après une étude des méthodes de lever utilisées chez TPLM-3D.

On retrouve donc, en première place, le calcul par rayonnement, qui est l'opérateur qui à la plus grande probabilité d'être exécuté vis-à-vis des méthodes de levers sur le terrain.

Pour l'initialisation du calcul de la planimétrie, on distingue deux cas :

- **Cas n°1 :** C'est le cas classique où, au moins, un point connu est stationné. L'orientation du réseau est faite sur ce même point, en visant des références. Le calcul de coordonnées approchées peut donc commencer à partir de ce point d'appui.
- **Cas n°2 :** C'est le cas où un point connu est stationné et un gisement d'orientation connu, mais éloigné de ce point. On définira donc une orientation fictive pour ce point afin d'initialiser le calcul, puis on réorientera le réseau une fois tous les points approchés calculés.

Ces deux cas ont été définis d'après les modes de lever les plus fréquemment mis en œuvre chez TPLM-3D. On pourrait en définir d'autres afin de prendre en compte toutes les possibilités de rattachement d'un réseau de points nouveaux.

Opérateur	Données		Observations		Total
	Point connu XY	G0	Ah	Dh	
Rayonnement	*2*	*1*	*1*	*1*	**5**
Intersection	*4*	*2*	*2*	-	**8**
Relèvement	*6*	-	*3*	-	**9**
Résection	*4*	-	*2*	*2*	**8**
Multilatération	*6*	-	-	*3*	**9**
Recoupement	*6*	*1*	*3*	-	**10**

Tableau 17: Récapitulatif du nombre de données nécessaires par opérateur pour le calcul d'un point

On pourra consulter, en annexe C de ce rapport, les formules de calcul intégrées à l'algorithme pour chaque opérateur de calcul élémentaire.

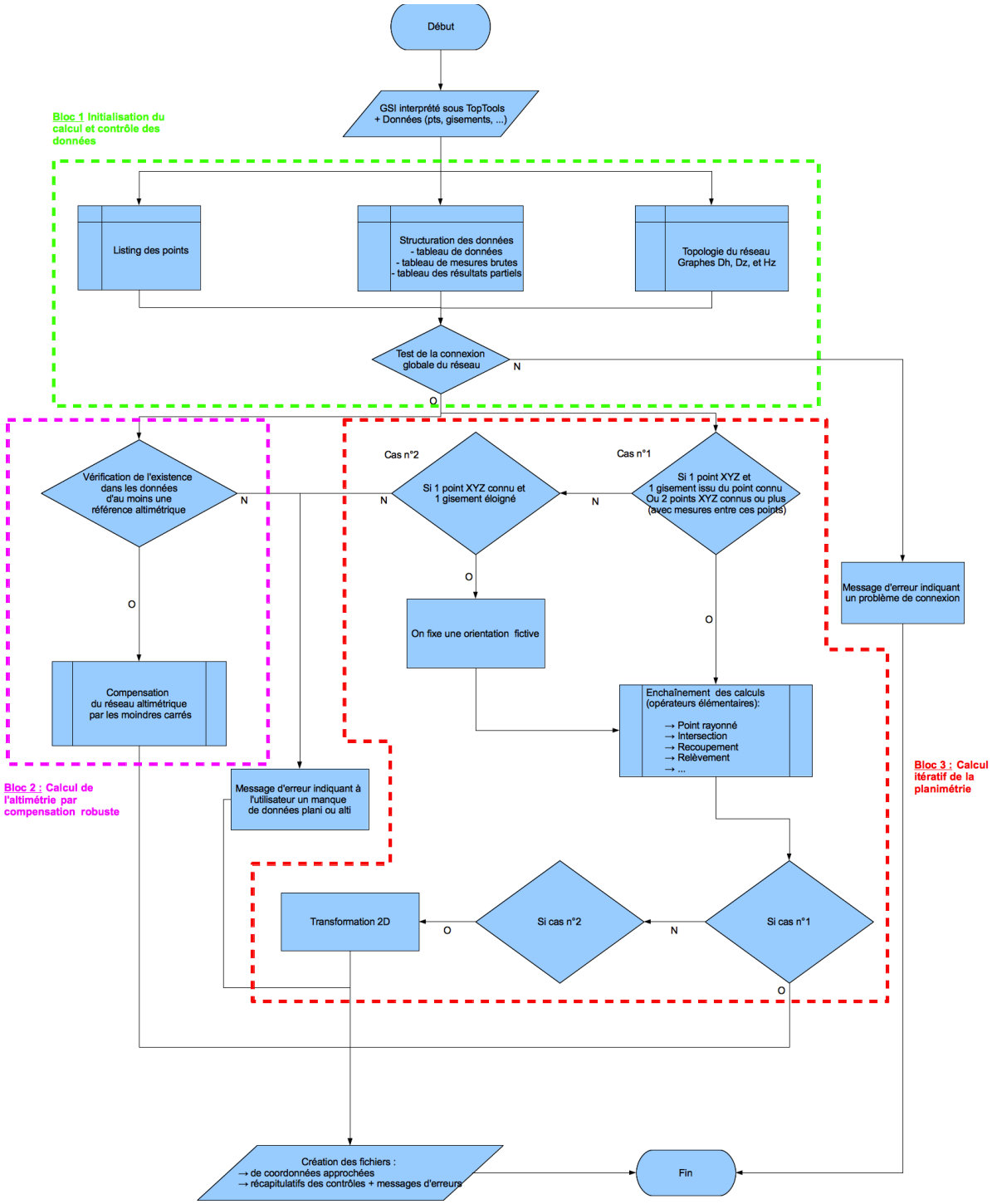

Début
GSI interprété sous TopTools
+ Données (pts, gisements, ...)
Bloc 1 Initialisation du calcul et contrôle des données
Listing des points
Structuration des données
- tableau de données
- tableau de mesures brutes
- tableau des résultats partiels
Topologie du réseau
Graphes Dh, Dz, et Hz
Test de la connexion globale du réseau
N
O
Vérification de l'existence dans les données d'au moins une référence altimétrique
N
O
Cas n°2
Si 1 point XYZ connu et 1 gisement éloigné
N
O
Cas n°1
Si 1 point XYZ et 1 gisement issu du point connu Ou 2 points XYZ connus ou plus (avec mesures entre ces points)
N
O
Message d'erreur indiquant un problème de connexion
Compensation du réseau altimétrique par les moindres carrés
On fixe une orientation fictive
Enchaînement des calculs (opérateurs élémentaires):
→ Point rayonné
→ Intersection
→ Recoupement
→ Relèvement
→ ...
Bloc 2 : Calcul de l'altimétrie par compensation robuste
Message d'erreur indiquant à l'utilisateur un manque de données plani ou alti
Bloc 3 : Calcul itératif de la planimétrie
Transformation 2D
O
Si cas n°2
N
Si cas n°1
O
Création des fichiers :
→ de coordonnées approchées
→ récapitulatifs des contrôles + messages d'erreurs
Fin

Figure 14: Structure générale de l'algorithme de calcul robuste de coordonnées

5.3.5 Notions de contrôle et de fiabilité de détermination des points approchés

Pour répondre à la condition de contrôle des observations et de détection d'éventuelles fautes, on a mis en place des méthodes de calcul robuste à plusieurs reprises.

Bien entendu, l'efficacité de ces méthodes de calcul n'est valable qu'en admettant l'hypothèse d'une redondance suffisante dans les données, qui permette de déterminer les coordonnées approchées d'un point par plusieurs modes de calcul.

5.3.5.1 Contrôle des observations réduites

Lors de la génération des graphes, les distances horizontales et dénivelées moyennes sont calculées par le biais d'une moyenne robuste.

La moyenne est calculée de manière itérative. A l'itération *i*, on affecte des poids aux observations, fonction de leur écart par rapport à la moyenne calculée à l'itération *i-1*. Cette moyenne est initialisée à l'aide d'un estimateur robuste : la médiane de la série d'observations. On pourra consulter, en annexe D (p. 11), un aperçu de la fonction des poids utilisée pour le calcul de cette moyenne robuste.

En paramètres de calcul, l'utilisateur peut définir les écarts à la moyenne maximum tolérés. Ainsi, si la moitié des écarts à la moyenne sont hors tolérance, il y a potentiellement une faute dans les observations des deux points concernés. L'observation « moyennée » est donc désactivée, dans le graphe correspondant, pour la suite des calculs. La décision d'écarter cette observation ne bloque pas les calculs planimétriques et altimétriques, du fait de la redondance supposée des observations.

En fixant, dans cette première étape de calcul, des tolérances larges, on peut déjà mettre en évidence des éventuelles fautes de matricules, ou problèmes de mesures de distances.

5.3.5.2 Contrôle global du réseau de dénivelées partielles

D'après une fonction de compensation robuste déjà implémentée par David Desbuisson, dans la librairie d'outils C++ propres à TPLM-3D, on a pu facilement mettre en place une compensation altimétrique robuste.

Lors du calcul de compensation, on contrôle ainsi de manière globale l'ensemble des dénivelées partielles. La solution obtenue grâce à la compensation étant proche de la réalité, même en présence de fautes, on peut facilement détecter les observations responsables. En les mettant en évidence dans le rapport de calcul, l'utilisateur peut, dès lors, contrôler toutes les observations liant les points (source et cible) d'une dénivelée identifiée comme faute.

5.3.5.3 Contrôle local des observations angulaires et de distances horizontales

Deux moyens de contrôle des observations nécessaires au calcul des coordonnées planimétriques approchées ont été développés pour satisfaire à la condition définie précédemment.

Dans un premier temps, de la même manière que pour le calcul des distances horizontales et dénivelées moyennes, on a mis en place un calcul de v0 robuste des stations. Ce calcul est exécuté à chaque fois qu'un nouveau point est déterminé en planimétrie. L'issue de ce calcul permet de mettre en évidence des observations angulaires défaillantes.

Partant du principe que la redondance des données est suffisante, on peut, à l'issue de ce calcul, décider de désactiver pour la suite les observations identifiées comme fautes. Elles n'interviendront donc plus dans le calcul des points approchés. On limite donc les chances de propagation d'une erreur sur les coordonnées des points proches de cette observation.

Le deuxième moyen de contrôle mis en place est une compensation robuste locale du point approché, calculé avec un opérateur élémentaire. On compense donc le point par *triangulatération*, en utilisant le maximum d'observations angulaires et de distances permettant de définir un lieu géométrique. La compensation robuste est exécutée uniquement si le nombre de lieux géométriques permettant de définir la position du point approché est supérieur à 2 (condition de redondance nécessaire pour un contrôle).

À l'issue de ce contrôle local d'un point, et des observations liées à ce point, on peut identifier les éventuelles fautes dans les observations, les écarter du calcul et définir un statut pour le point compensé. S'il y a présence d'observations identifiées comme des fautes par la compensation robuste, et/ou si la précision planimétrique du point dépasse le seuil fixé en paramètre, on peut alors affecter un statut *douteux* au point compensé. Ce point est alors écarté pour la suite des calculs, puis sera recalculé à la fin du processus itératif. Sinon, le statut *définitif* est attribué au point et ses coordonnées sont stockées pour être réutilisées dans la suite des calculs.

5.3.5.4 Niveau de fiabilité de détermination des points approchés

Cette notion est implémentée dans le calcul planimétrique. Elle permet de sélectionner les meilleurs points lors de l'exécution des calculs à l'aide d'opérateurs élémentaires.

A l'initialisation du processus itératif, le niveau de fiabilité est fixé à 1. Ensuite, selon la configuration du réseau, la distribution des points d'appui et la mise en évidence de fautes probables, ce niveau peut être abaissé pour permettre de calculer l'ensemble des points du réseau.

Ainsi :

- au niveau de fiabilité 1 : on utilisera seulement les points d'appui et les points ayant un statut définitif. Par ailleurs, pour les opérateurs élémentaires des calculs nécessitant la connaissance des v0 des stations, on ne retiendra, parmi les points d'appui et les points définitifs que ceux possédant un v0 contrôlé, c'est-à-dire avec au moins deux visées de référence,
- au niveau de fiabilité 2 : on s'autorisera à utiliser les points non contrôlés dans les données, tout en gardant la condition sur les v0 contrôlés,
- au niveau de fiabilité 3 : toutes les données disponibles sont utilisées, on prend donc aussi en compte les stations dont les v0 ne sont pas contrôlés.

5.3.6 Tests et validation de l'algorithme

Tout au long du développement de l'algorithme, un jeu de données issu des différents réseaux implantés sur les parkings de TPLM-3D a permis de valider, étape par étape, les fonctions écrites. Lorsque l'on a pu aboutir à une version quasi finalisée de l'algorithme de calcul de coordonnées approchées, une importante série de tests sur des jeux de données issus de chantiers réels de TPLM-3D a été mise en place.

Chaque test a permis de mettre en évidence quelques petites défaillances de l'algorithme, qui ont été immédiatement corrigées.

On a aussi testé la qualité des coordonnées approchées calculées avec l'algorithme en exécutant un calcul sous LTOP. Pour chaque test effectué, la qualité des coordonnées approchées était suffisante. Elle le resta même dans le cas de polygonales entraînant un cumul d'imprécisions, celles-ci se propageant dans les calculs pour affecter tous les points du réseau.

Enfin, on a testé l'efficacité du calcul en présence de fautes dans les observations. On a ainsi inséré, dans les fichiers d'observations, des fautes courantes, de matricules, ou de hauteurs de prismes. L'algorithme a correctement réagi et écarté les fautes responsables, d'autant mieux que leur nombre était faible (une ou deux grosses fautes).

Le bilan de ce « débuggage » est positif. On a pu mettre en évidence des *bugs* et de nouvelles pistes d'optimisation du module d'interprétation et de réduction des fichiers *.GSI.

Par exemple, il pourrait être intéressant de contrôler la cohérence des visées en cercle gauche et cercle droite dès la réduction des données. A cette étape, on pourrait aussi prévoir de mettre en place un contrôle des matricules.

5.4 Bilan

Les développements informatiques, réalisés au cours de ce projet de recherche, se sont concentrés autour de la mise en place d'un algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées. Ce module, clef de la chaîne de traitement, permet de faire la liaison entre l'interprétation du carnet *.GSI sous TopTools et le calcul de compensation sous LTOP.

L'algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées développé pour TopTools répond aux objectifs définis dans le paragraphe 5.3.1. A travers les différents tests effectués, on a pu mettre en évidence facilement des fautes grossières, grâce à l'utilisation de méthodes de calcul robuste implémentées à plusieurs niveaux.

Les moyennes robustes développées pour le contrôle des observations réduites facilitent la détection de fautes dans une série de mesures d'une même distance ou dénivelée. De même, le calcul des v0 robustes des stations permet d'écarter efficacement les visées de références fausses. De plus, les méthodes d'estimation robuste développées dans les calculs de compensation garantissent une fiabilité des résultats, tout en offrant quelques moyens de détection de fautes probables à l'utilisateur.

Enfin, la mise en place d'un niveau de fiabilité de détermination des points et d'un contrôle local par *triangulatération*, fournit à l'utilisateur suffisamment d'indicateurs pour évaluer la qualité des points approchés calculés par TopTools.

De nombreux *bugs* mineurs ont été corrigés lors de la phase de tests du logiciel. Cette étape importante de validation des développements informatiques a permis de mettre en évidence des comportements particuliers de l'algorithme. On a ainsi pu adapter la rédaction de la notice d'utilisation en tenant compte de ces spécificités.

Conclusion et Perspectives

Les recherches menées au cours de ce projet de fin d'études ont permis de répondre pleinement aux objectifs fixés en introduction de ce mémoire. Dans un premier temps, un état de l'art faisant l'inventaire des logiciels de compensation de mesures topographiques a permis de confronter les caractéristiques d'un choix restreint de logiciels. On a établi une classification des caractéristiques principales d'un logiciel de compensation spécialisé. Ensuite, sur la base de cette confrontation, on a explicité divers concepts et principes mathématiques importants qui offrent à un utilisateur des outils très intéressants pour l'analyse de la précision et de la fiabilité d'un réseau de points. Enfin, une étude comparative réalisée à partir de la compensation d'un réseau sous LTOP, TRINET+ et Comp3D, et à travers laquelle on a apprécié l'efficacité de la compensation robuste et des indicateurs de fiabilité locale et externe, a permis de valider le choix du logiciel LTOP par TPLM-3D.

Ayant une meilleure compréhension et connaissance des multiples fonctionnalités de LTOP, on a, dans un second temps, testé la chaîne de traitement informelle de TPLM-3D. En se basant sur la compensation de réseaux nécessitant un paramétrage particulier de LTOP, on a mis en évidence les faiblesses de cette procédure et proposé des axes d'optimisation. On a ainsi démontré la nécessité de développer d'abord un algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées pour bénéficier de toute la puissance des outils de recherche de fautes mis à disposition par LTOP. Suite à une définition de chaque axe en termes de développement informatique pour l'application TopTools, on a établi ensuite une classification par ordre de priorité. La deuxième partie de ce projet de fin d'études a été consacrée à la création de l'algorithme de calcul robuste de coordonnées approchées.

Enfin, on a formalisé la procédure de traitement d'un calcul de compensation au sein de TPLM-3D, à travers l'écriture d'une notice d'utilisation des logiciels LTOP et TopTools, et la création d'une fiche de contrôle (cf. Annexes D et E). Celles-ci sont adaptées aux contraintes imposées par les méthodes et instruments utilisés au sein de l'entreprise.

L'utilisation de LTOP est un atout pour TPLM-3D. L'utilisateur dispose de nombreux modes de calculs et indicateurs permettant d'effectuer une analyse poussée de la cohérence d'un réseau de points. Cette étude aura permis à TPLM-3D d'optimiser encore l'emploi du logiciel LTOP pour la compensation de réseau de mesures topographiques. Une nouvelle chaîne de traitement, plus accessible aux ingénieurs et techniciens non formés sur ce logiciel peu convivial, a été intégrée aux processus de l'entreprise. A ce jour, TPLM-3D dispose donc d'outils et de procédures adaptés et adaptables au contrôle de la qualité des séries de mesures topographiques effectuées sur des chantiers spéciaux.

Ce projet a conduit à l'élaboration d'un cahier des charges de développement autour de l'application TopTools. Le calcul robuste de coordonnées approchées, module clef permettant de faire une bonne liaison entre l'étape d'interprétation des carnets *. GSI et le calcul de compensation sous LTOP, a été développé puis testé et validé. Pour l'évolution future et la maintenance de l'application TopTools, en plus des axes de développement définis dans le cahier des charges, d'autres optimisations sont prévues, telle que la génération automatique de fichiers d'observations à partir de fichier **.dxf* pour une pré-analyse sous LTOP.

Table des illustrations

- Liste des figures :

Figure 1: Fonction de Huber et Fonction des moindres carrés (P.H. Cattin [2012]) 23
Figure 2: Fonction d'influence pour l'estimateur de Huber (P.H. Cattin [2012])..... 25
Figure 3: Distribution des w_i sans faute et avec faute (P.H. Cattin [2012])..... 30
Figure 4: Rectangles de fiabilité des points A et B (P.H. Cattin [2012])..... 32
Figure 5: Croquis du réseau calculé sous LTOP avec indicateurs de précision et de fiabilité. 38
Figure 6: Vue 3D du réseau calculé sous TRINET+ avec indicateurs de précision (ellipsoïdes en vert anis) et de fiabilité (vecteurs en jaune)..... 39
Figure 7: Chaîne de traitement actuelle pour la compensation d'un réseau sous LTOP 45
Figure 8: Schéma de principe de fonctionnement des fonctions natives du logiciel TopTools46
Figure 9: Extrait d'un fichier GSI chargé sous TopTools. En rouge, les lignes correspondant à des codes station ou référence 47
Figure 10: Extrait d'un GSI interprété sous TopTools. En rouge, la ligne de station, en vert les lignes de références, et en bleu les mesures de points de détails 47
Figure 11: Plan du réseau "Conduite Forcée" 48
Figure 12: Plan du réseau "Descente de Point" 50
Figure 13: Nouvelle chaîne de traitement 54
Figure 14: Structure générale de l'algorithme de calcul robuste de coordonnées 59

- Liste des tableaux :

Tableau 1: Trois différentes catégories de logiciels..... 8
Tableau 2: Coordonnées acceptées par les logiciels 11
Tableau 3: Observations acceptées par les logiciels 12
Tableau 4: Tableau récapitulatif des caractéristiques de chaque logiciel 17
Tableau 5: Récapitulatif des matrices des cofacteurs..... 26
Tableau 6: Interprétation des erreurs résiduelles normées 30
Tableau 7: Coordonnées compensées sous LTOP des points du réseau secondaire 34
Tableau 8: Paramètres des ellipses d'erreur et écart-type sur la position XYZ de chaque point du réseau primaire 34
Tableau 9: Ecart en position XYZ pour chaque point entre les coordonnées issues du calcul LTOP et celles issues des calculs TRINET+ et Comp3D 35
Tableau 10: Ecart en position XYZ pour chaque point entre les coordonnées issues des calculs TRINET+ et Comp3D 36
Tableau 11: Paramètres des ellipsoïdes d'erreurs calculés avec Comp3D 36
Tableau 12: Paramètres des ellipsoïdes d'erreurs calculés avec TRINET+ 36
Tableau 13: Indicateurs de fiabilité des points calculés sous LTOP..... 37
Tableau 14: Indicateurs de fiabilité des points calculés sous TRINET+ 37
Tableau 15: Ecarts sur les coordonnées des points après introduction d'une faute minime, par rapport au jeu de coordonnées de référence 40
Tableau 16 : Ecarts sur les coordonnées des points après introduction des fautes combinées, par rapport au jeu de coordonnées de référence 42
Tableau 17: Récapitulatif du nombre de données nécessaires par opérateur pour le calcul d'un point..... 58

Bibliographie

- Projets de fin d'études:

Chaurand, R. [2011]. *Optimisation de la mesure de l'anneau de stockage de l'ESRF avec un laser tracker AT401 Leica.* Mémoire d'ingénieur, INSA Strasbourg.

Desbuisson, D. [1998]. *Interpolation et filtrage de données Laser Scanner.* Mémoire d'ingénieur, INSA Strasbourg.

Douche, S. [2002]. *Zone de lancement Ariane 5 - Etude méthodologique des contrôles d'usures des carneaux.* Travail de fin d'études, ESGT.

Emain, G. [2006]. *Analyses des relevés topographiques de l'ESRF.* Travail de fin d'études, ESGT.

Guérin, C. [2010]. *Comparaison de logiciels d'ajustements de mesures topographiques.* Travail de fin d'études, ESGT.

Hermier, E. [2011]. *Mise en place et formalisation d'une méthode de mesure tachéométrique et lasergrammétrique de précision et développement d'un logiciel de calcul adapté.* Mémoire d'ingénieur, INSA Strasbourg.

- Ouvrages, Revues, Articles:

Baarda, W. [1968]. A Testing Procedure for Use in Geodetics Networks. *Netherlands Geodetic Commission. Vol. II n°5.* Publications on Geodesy.

Brabant, M. [2003]. *Maîtriser la topographie, 2ème édition.* Edition Eyrolles, ISBN : 2-212-11279-3.

Carosio, A. [1996]. Les méthodes de la statistique robuste au service de la compensation de réseaux géodésiques. *Rapport 257f.* (Ecole Polytechnique Fédérale - Institut de Géodésie et de Photogrammétrie, Zurich)

Carosio, A., & Al. [1990]. Fiabilité dans la mensuration. *Journée d'étude du 16 mars 1990* . (Ecole Polytechnique Fédérale - Institut de Géodésie et de Photogrammétrie, Zurich)

Cattin, P. [2007]. TRINET+ Un logiciel d'ajustement tridimensionnel d'observations terrestres et satellitaires. *Bulletin d'informations des Ingénieurs Géomètres de Suisse Occidentale, N°15*.

Cattin, P., Brahier, J., & Jotterand, D. [2011]. Auscultation tridimensionnelle d'ouvrages d'art. *Revue Géomatique Suisse*.

Demming, R., & Duffy, D. [2012]. *Introduction to the Boost C++ Librairies* (Vol. I et II). Edition Datasim Education BV, ISBN 978-94-91028-02-1.

Ghilani, C. [2012]. *Adjustement Computations : Spatial Data Analysis 5th ed.* Edition John Wiley & Sons, ISBN : 978-0-470-46491-5.

Horstmann, C., & Bud, T. [2004]. *La bible du C++.* USA: Edition John Wiley & Sons, ISBN : 2-7429-3717-X.

Jones, M. [2002]. *Software for Survey Applications.* Internal Note, EDMS Document N°339911, CERN.

Siek, J., Lee, L., & Lemsdaine, A. [2002]. *The Boost Graph Library, User Guide and Reference Manual.* USA: Edition Addison-Wesley, ISBN : 0-201-72914-8.

Million, C. [1996]. Brève introduction à la topométrie logiciel. *Revue XYZ , n°66*.

Million, C. [1994]. Le calcul automatique de coordonnées approchées. *Revue Geotop , n°132*.

Office Fédéral de Topographie (OFT). [1989]. NAEKO, Programme pour le calcul de coordonnées provisoires et pour la recheche de fautes. *Bulletin du centre de calcul de l'OFT , N°17*.

Sillard, P. [2001]. *Estimation par les moindres carrés.* Paris: Hermès Science Publications : ISBN 2-7462-0339-1.

Steeves, R. R. [1983]. Statistical Post-Analysis of Least Squares Adjustement Results. *Adjustement and Analysis Seminars* .

- Documents de formation et notices d'utilisation:

Cattin, P. [2012]. *Méthodes d'estimation, Version 3.2.* Cours à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Département Environnement Construit et Géoinformation, Orientation Géomatique.

Egels, Y. [2003]. *Document descriptif du logiciel de compensation micro-géodésique Comp3D, Version 3.0.*

Durand, S. [2009a]. *Topométrie de précision ES2.* Cours de l'Ecole Supérieur des Géomètres Topographes.

Durand, S. [2009b]. *Topométrie de précision ES3.* Cours de l'Ecole Supérieur des Géomètres Topographes.

Fischer, J. [2011]. *Compensation d'un réseau spatial ou 3D.* Cours à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spétialité Topographie.

Gubler, E. [2003]. *Manuel d'utilisation du logiciel LTOP.* Swisstopo.

Guillaume, S., Muller, C., & Cattin, P. [2008]. *Manuel d'utilisation du logiciel TRINET+.* Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud.

Géomédia SA. [2005]. *Covadis, Calcul Topométrique et Géocodification, Manuel de référence.*

Landes, T. [2011]. *Calculs d'erreurs et de compensation I et II.* Cours à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spécialité Topographie.

Landes, T. [2009]. *Cours de Topométrie I.* Cours à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spécialité Topographie.

Leica Geosystems. [2002]. *Leica TCRA1101 - Caractéristiques Techniques* . Suisse.

Leica Geosystems. [2009]. *Leica TS30 - Caractéristiques Techniques* . Suisse.

Mayoud, M., & Al. [1988]. *Logiciel Général de Compensation, Manuel d'utilisation.*

- Sites internet:

Azimut@[2004], *Azitop*

URL: http://www.azimut.fr/azitop.html

BitWise Ideas Inc.@[2012], *GeoLab*

URL: http://www.bitwiseideas.com/Products/GeoLab/Index.htm

cpluplus.com@[2010], *The C++ Resources Network*
URL: http://www.cplusplus.com/
Géomédia SA@[2012], *Covadis*
URL: http://www.geo-media.com/fr_covadis.htm
Leica Geosystems@[2012], *Leica GeoMoS*
URL: http://www.leica-geosystems.fr/fr/Leica-GeoMoS_4802.htm
TPLM-3D@[2012], *TPLM-3D ToPographie Lasergrammétrie Modélisation 3D*
URL: http://www.tplm-3d.fr
Trimble@[2012]*, Trimble Geomatics Office*
URL: http://www.trimble.com/support_trl.asp?Nav=Collection-3651&pt=Trimble%20Geomatics%20Office%E2%84%A2